第7卷 第2期
2014年4月

中国光学
Chinese Optics

Vol. 7 No. 2
Apr. 2014

文章编号 2095-1531(2014)02-0267-07

层层自组装金纳米粒子表面等离子体引发光电流应用于等离子体增感太阳能电池

苏彦勋[1,2*],柯沅锋[2],蔡士良[2],姚芊瑜[2],徐嘉妘[2],龚柏谚[2]
(1. 成功大学 材料科学与工程学系 台南 70101,中国台湾;
2. 东华大学 材料科学与工程学系 花莲 97447,中国台湾)

摘要:等离子体增感太阳能电池中,层层自组装金纳米粒子的表面等离子体共振能产生光电电流,金纳米粒子层的光电转换效率随表面等离子体共振强度的提升而增加。等离子体增感太阳能电池初步试验光电转换效能为0.75%。利用模型仿真电荷分离的现象、光电电流的产生,以及表面等离子体共振和光电电流产生之间的关系来解释实验结果。在未来,通过优化等离子体增感太阳能电池组件,可以进一步提升其转换效率。这在表面等离子体激活太阳能电池及等离子体太阳能电池领域将有很大应用潜力。

关 键 词:太阳能电池;金纳米粒子;表面等离子体
中图分类号:TM914.4 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20140702.0267

Layer self-assembly of gold nanoparticles surface plasmon triggered photoelectric current applied plasmon sensitized solar cell

SU Yen-hsun[1,2*], KE Yuan-feng[2], CAI Shi-liang[2], YAO Qian-yu[2], XYU Jia-yun[2], KUNG Po-yen[2]
(1. *Department of Materials Science and Engineering, Cheng Kung University, Tainan* 70101, *Taiwan, China*;
2. *Department of Materials Science and Engineering, Dong Hwa University, Hualian* 97447 *Taiwan, China*)
* *Corresponding author, E-mail: yhsu@mail.ncku.edu.tw*

Abstract: In plasmon-sensitized solar cells, layer self-assembly of gold nanoparticles surface plasmon resonance can produce photoelectric current. Photoelectric conversion efficiency of gold nanoparticles layer increases with the intensity of surface plasmon resonance. The efficiency is up to 0.75%. We use the model to simulate the phenomenon of charge separation, produce of photoelectric current and relationship between surface plasmon resonance and the photoelectric currents to explain the experimental results. In the future, these nanoparticle materials have considerable potential applications in surface plasmon activated solar cells and solar cells plasmon.

Key words: solar cell; gold nanoparticles; surface plasmon

收稿日期:2013-10-09;**修订日期**:2014-02-13
基金项目:台湾科学委员会研究计划资助项目(No. 102-2221-E-006-293-MY3)

1 引 言

贵重金属纳米粒子具有许多共同的物理及光学的性质,如表面等离子体共振[1-6]。表面等离子体共振会在金纳米粒子的表面形成较强电磁场,此电磁场已经被广泛地应用在拉曼散射[7]、光致激光[8]、生物发光器[9]及太阳能电池上[10]。

最近,表面等离子体共振被用于分离二氧化钛薄膜上贵金属纳米粒子电荷,使得在可见光照射下形成光电流,这使等离子体激活的太阳能电池及等离子体太阳能电池在未来具有相当大的应用潜力[3,11-14]。有一些论文已经提出表面等离子体引起二氧化钛薄膜上金纳米粒子电荷分离现象的结果[3,11-14]。在这些实验中,光子源于伴随着等离子体的入射光,其担任激子在金纳米粒子上产生电荷分离。接着电子对金纳米粒子产生排斥并注入二氧化钛薄膜。镀有金纳米粒子的二氧化钛薄膜的光电流能在可见光辐射下被量测。表面等离子体共振是一种电磁驻波形式。电磁驻波是一个和频率有关的物理参数,其能够产生和频率无关的光电流(频率范围在可见光 10^{14} ~ 10^{15} Hz)。

本论文中,将金纳米粒子镀在二氧化钛薄膜上来形成光电流,如图1。表面等离子体共振被用于分离二氧化钛薄膜上金纳米粒子的电荷和形成光电流。利用理论模型来证实电荷分离的现象、光电流的产生,以及表面等离子体共振和光电流形成之间的关系。在等离子体激活的太阳能电池领域中,此结果适用于改善和增加太阳能电池光电流的强度。

2 实 验

20 g的P-25 二氧化钛(Degussa,Shinjuku-ku,Japan)粉末加入15 mL的去离子水,混合0.2 mL Triton-X 100(Sigma,St. Louis,MO,USA)及0.4 mL的乙醛(99.5%;Fluka,Heidelberg,Germany),并使用超音波震荡三天。接着,将0.5 mL的二氧化钛溶液以转速1 000 rad/s、旋转20 s涂布在掺杂

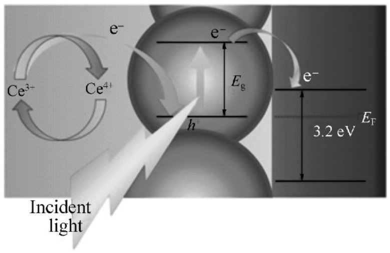
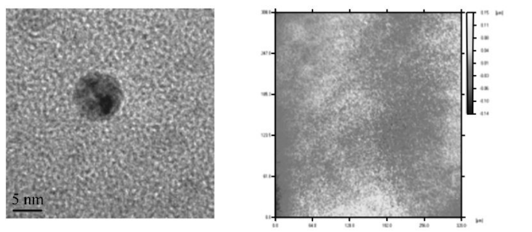


图1 在表面等离子体敏化太阳能电池中表面等离子体将电荷分离并注入于n型半导体示意图

Fig. 1 Surface plasmon will charge separation in the surface plasmon-sensitized solar cells and injected in the n-type semiconductor schematic

氟的二氧化锡(FTO)玻璃基材上,经过500 ℃、10 h的煅烧后,掺杂氟的二氧化锡(FTO)会产生薄层电阻为10.3 Ω·m^2,且P-25会有更高的锐钛矿含量(金红石:锐钛矿=1:4)[15]。

金纳米粒子则使用化学还原的方式进行合成。将30 mL、0.003 mol/L的金氯酸水溶液(AlfaAesar,Lancashire,UK)加入到已烷中80 mL、0.005 mol/L的四辛基溴化铵(Sigma)。在此溶液中加入25 mL、0.05 mol/L的硼氢化钠水溶液(Alfa Aesar)。溶液颜色由黄色转至黑色。四辛基溴化铵会改变金纳米粒子。利用穿透式电子显微镜观察在已烷中和在二氧化钛FTO基材上的金纳米粒子形态呈现于图2。



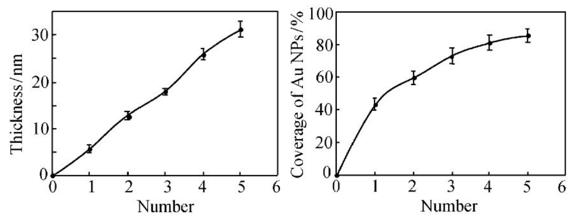
(a) 金纳米粒子形貌图 (a) Morphology of a gold nanoparticle

(b) 涂敷于二氧化钛表面的形貌图 (b) Morphology of gold nanoparticles coated on the titanium dioxide electrode

图2 金纳米粒子图形貌图和涂敷于二氧化钛表面的形貌图

Fig. 2 Morphologies of a gold nanoparticle and gold nanoparticles coated on the titanium dioxide electrode

巯基-丙基-三-甲氧基硅烷(95%;Alfa Aesar)作为分子联结器,透过自组装单分子膜联结基材和金纳米粒子。为了获得表面含有氢氧离子在的基材,将二氧化钛/FTO 浸泡在溶液($NH_4OH/H_2O_2/H_2O=5:5:1$)中 3 h,然后将二氧化钛/FTO 在 1% 的 3-巯基丙基三甲氧基硅烷己烷中浸泡一天,再放入金纳米粒子胶体中浸泡一天,金纳米粒子就会沉积在基材上。分子联结器包含 2%(质量分数)的 2-巯基乙醇(98%;Alfa Aesar)、2%(质量分数)在己烷中的 1,3-丙二硫醇(97%;Alfa Aesar),其加入后可修饰金纳米粒子的表面。将金纳米粒子在分子联结器中浸泡一天,再次将样品在金纳米粒子胶体中浸泡一天,上述步骤重复 5 次,基材上就能堆积一层层的金纳米粒子,将其作为阳极。将白金溅镀在掺杂铟的二氧化锡玻璃上作为阴极。在二氧化钛/FTO 上的层状金纳米粒子的厚度及比例示于图 3。



(a) 金纳米粒子厚度与二氧化钛表面层层堆积关系
(a) Thickness of rela-tionship gold nanoparticles on the titanium dioxide electrode

(b) 金纳米粒子空隙率与二氧化钛表面层层堆层关系
(b) Porosity of relationship gold nanoparticles on the titanium dioxide electrode

图 3　金纳米粒子厚度和空隙率与二氧化钛表面层层堆积关系图

Fig. 3　Thickness and porosity of relationship gold nanoparticles on the titanium dioxide electrode

电解液是以水为基底的溶液(35% 的乙醇和 65% 的水),包含 0.1 mol/L 的 $Ce(NO_3)_3$/0.05 mol/L $Ce(NO_3)_4$(99%;ICNBiomedicals, Inc., Aurora, OH, USA)。

利用 HF-2000 穿透式电子显微镜在 200 kV 下观察金纳米粒子的形态。样品直接注入石英管后使用紫外光/可见光光谱仪(Hitachi U-2001 spectrophotometer)做紫外光/可见光分析并观察金纳米粒子的吸收。由椭圆分光仪(h-VASE; Woollam, Lincoln, NE, USA)测试在可见光范围的光学性质及厚度。利用 Keithley 237 测量电性、电流及电压。在模拟太阳能(AM1.5)的能量为 100 mW/cm^{2}照射条件下量测组件的 J-V 曲线。

3　结果与讨论

3.1　表面等离子体共振的能阶

当金属粒子直径超过 3 nm 时,其具有类似块材的物理性质且能阶是连续的[16]。在我们的实验情况下,金纳米粒子的直径约 6 nm,如图 2a 所示。类似块材的金纳米粒子其费米能阶为功函数。表面等离子体共振引起激子分离正、负电荷。表面等离子体共振的状态密度在可见光波长 510 ~580 nm 的区域。在太阳能电池中,类似块材的金纳米粒子的费米能阶接触半导体来平衡表面的电子密度。表面等离子体共振产生偶极之位能为参考能阶 E,能阶 E 低于金纳米粒子的功函数。E 和功函数之间的能量差为 E_g,如图 1 所示。

金纳米粒子的表面等离子体共振产生偶极,可作为帮助光电子转换的能阶。然后光电子会从金纳米粒子的表面等离子体共振能阶转换至半导体的导带[17]。光电子被注入到阴极,并且被肖特基势垒抑制而无法返回[18]。电解液的供应能够促使带电荷的金纳米粒子的更新,如图 1 所示。

3.2　表面等离子体共振提升光电电压

开路电压(V_{oc})由电解液的化学势和半导体的导带(CB)之间的差异决定($V_{oc}=CB-\mu$)。在正规溶液的情况下,电解液的吉布斯自由能如下式所示:

$$\mu = X_{Ce^{4+}}^2 G_{Ce^{4+}} + X_{Ce^{3+}}^2 G_{Ce^{3+}} + 2\Omega X_{Ce^{4+}} X_{Ce^{3+}}. \tag{1}$$

式中,μ 为电解液的吉布斯自由能,$X_{Ce^{4+}}$ 为 Ce^{4+} 的比例,$X_{Ce^{3+}}$ 为 Ce^{3+} 的比例,$G_{Ce^{4+}}$ 为 Ce^{4+} 的吉布斯自由能,$G_{Ce^{3+}}$ 为 Ce^{3+} 的吉布斯自由能,Ω 为 $G_{Ce^{4+}}$ 和 $G_{Ce^{3+}}$ 之间的反应关系(在一般溶液中,Ω 为常数)。当外部电场应用于系统时,自由能关系式为 $G'=G-qV$,q 是系统的电荷,V 是外部电场的电势,G 是吉布斯自由能。在 Ce^{4+} 系统,因为系统内的 4 个电子,自由能为 $G'_{Ce^{4+}}=G_{Ce^{4+}}-(+4q)V$。另一方面,在 Ce^{3+} 系统,因为系统内的

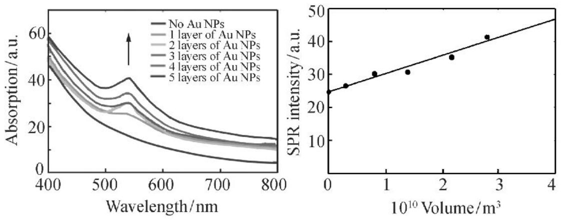
3个电子,自由能为 $G'_{Ce^{3+}} = G_{Ce^{3+}} - (+3q)V$。

开路电压(V_{oc})如下列式子所示:

$$V'_{oc}(V) = V_{oc} + q(4X^2_{Ce^{4+}} + 3X^2_{Ce^{3+}})V . \quad (2)$$

开路电压(V_{oc})和外部电场成正比。

金纳米粒子的表面等离子体共振在近场提供了一强外部电场。当金纳米粒子数量增加时,表面等离子体共振的强度也会提升,如图4所示。



(a) 吸收光谱
(a) Absorption spectrum

(b) 表面等离子体强度关系
(b) Strength relationship of the relationship surface plasmon

图4 金纳米粒子于二氧化钛表面层层堆积图

Fig. 4 Gold nanoparticles on the titanium dioxide surface layers stacked chart

当金纳米粒子是随意排列时,因为几何效应的缘故,而无表面等离子体共振因特殊数组所产生的特征峰值,如图2b所示。在我们的实验结果中,开路电压(V_{oc})和外部电场成正比,如图5c所示,与上述的结果一致。表面等离子体共振产生较强的电场可提升光电电池的开路电压。

3.3 表面等离子体共振提升光电电流

在光电电池中电子激发的过程如下式所示[19-20]:

$$\frac{dn}{dt} = g - \frac{n}{\tau} . \quad (3)$$

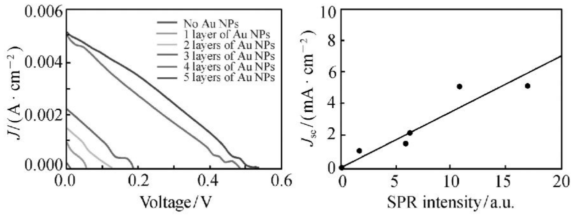
式中,g 为产生量,τ 为生命周期,Φ_n 为电子的能阶,n 为粒子数。在极短时间间隔,g、Φ_n、n 如下列式子所示:

$$\begin{cases} n \Rightarrow n + \rho_n(t) \\ \phi_n \Rightarrow \phi_n + \phi_n(t) \\ g \Rightarrow g \end{cases} . \quad (4)$$

此可以被运用在电子激发过程:

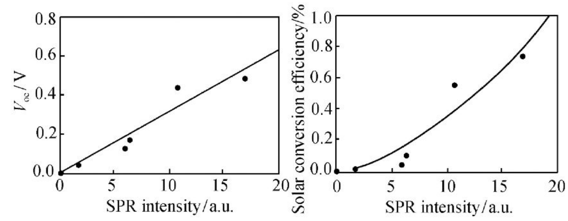
$$\frac{d\rho_n}{dt} = g - \frac{\rho_n}{\tau} , \quad (5)$$

and $n = n_0 e^{(E_f - E_0)/k_B T}$ and



(a) 光电流
(a) Photoelectric current

(b) 短路电流和表面等离子体强度关系
(b) Strength of the relationship between short-circuit current and surface plasmon



(c) 开路电压和表面电浆子强度关系
(c) Strength of the relationship between open circuit voltage and surface plasmon

(d) 光电转换效率和表面电浆子强度关系
(d) Strength of the relationship between photoelectric conversion efficiency and surface plasmon peak position

图5 金纳米粒子于二氧化钛表面层层堆积图

Fig. 5 Gold nanoparticles on the titanium dioxide surface layers stacked chart

$$E_f - E_0 = -e\phi_n \Rightarrow \rho_n = -\frac{en}{k_B T}\phi_n$$

$$\frac{e^2 n}{k_B T}\frac{d\phi_n}{dt} + eg + \frac{e^2 n}{\tau k_B T}\phi_n = 0 . \quad (6)$$

在以上的等式中,等效容量 $C_\mu = C_{ch} = \frac{e^2 n}{k_B T}$,等效电流 $I_{ph} = eg$,等效电阻 $R_{rec} = (\frac{e^2 n}{\tau k_B T})^{-1}$。在上述的等式中,$eg$ 等效电流的特解:$J \propto -eg$。

表面等离子体共振能提供强电磁场,能够提升电子在能带跃迁。在这个过程中,g 会增加。当 g 增加时,光电电池的有效电流也会提升。短路电流也同时提高。在我们的实验中,短路电流和表面等离子体共振强度成正比,如图5b所示,其关系式为:$J_{sc}(V) \propto -eg \propto V$。

3.4 表面等离子体共振提升光电特性

在一个光电电池中,太阳能电池的电流-电压曲线受重要参数控制,包含短路电流 J_{sc},开路电压 V_{oc},电流 J_{mp},电压 V_{mp},以及能量点最大值

P_{max}[21]。填充因子(filling factor(F. F.))被定义为:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}J_{sc}} = \frac{V_{mp}J_{mp}}{V_{oc}J_{sc}}. \quad (7)$$

太阳能转换效率(η)如下:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_s} = \frac{FFV_{oc}J_{sc}}{P_s} = \frac{V_{mp}J_{mp}}{P_s}. \quad (8)$$

式中,P_s为输入的太阳能辐照度($mW \cdot cm^{-2}$)。

在太阳能电池模型的 p-n 接口,V_{mp}、J_{mp}和 FF 可根据如下公式获得[22]:

$$V_{mp} = V_{oc} - \frac{k_B T}{e}\ln(1 + \frac{eV_{oc}}{k_B T})$$

$$J_{mp} = J_s[\exp(\frac{eV_{mp}}{k_B T} - 1) + J_{sc}]$$

J_s为光电电池的饱和电压,且

$$FF = \frac{eV_{oc}/k_B T - \ln(1 + eV_{oc}/k_B T)}{1 + eV_{oc}/k_B T}. \quad (9)$$

当表面等离子体共振被应用在太阳能电池上,$V'_{oc} = V_{oc} + q(4X^2_{Ce^{4+}} + 3X^2_{Ce^{3+}})V$,且 $J_{sc} \propto V$ 代入上述等式中,则 V'_{mp}、J'_{mp}和 FF'在有表面电浆共振的太阳能电池中的情况如下:

$$FF'(V) = \frac{(b-1) + aV/k_B T - \ln(b + aV/k_B T)}{b + aV/k_B T}, \quad (10)$$

式中,$b = 1 + eV_{oc}/k_B T$, $a = eq(4X^2_{Ce^{4+}} + 3X^2_{Ce^{3+}})$。对 FF'而言,$(b-1) + aV/k_B T$ 和 $-\ln(b + aV/k_B T)$ 互相抵制,使得表面等离子体共振强度和填充因子之间无规律的关系,如表 1 所示。太阳能转换效率(η')如下:

$$\eta'(V) = \frac{P_{max}}{P_s} = \frac{V_{mp}J_{mp}}{P_s} = \frac{V_{mp} + \frac{a}{e}V)[\frac{J_{mp}}{J_s} + J'_{sc}(1 - \frac{\exp(0)}{J_s})]}{P_s}, \quad (11)$$

太阳能转换效率(η')是外部表面等离子体共振电场的二阶方程式。在我们的实验中,太阳能转换效率(η')是表面等离子体共振强度的二阶方程式,如图 5d 所示。另外,从表 1 中可以看出金纳米粒子在二氧化钛表面层层堆积光电转换效率可达 0.75%。

表 1　金纳米粒子在二氧化钛表面层层堆积的光电性质关系

Tab. 1　Gold nanoparticles on the titanium dioxide surface layers stacked of photoelectric properties relation

	V_{oc}/V	J_{sc}/($mA \cdot cm^2$)	f. f. /%	η/%
1 layer of Au NPs	0.042	1.076	35.045	0.016
2 layers of Au NPs	0.127	1.562	22.266	0.044
3 layers of Au NPs	0.17	2.260	27.503	0.105
4 layers of Au NPs	0.445	5.140	24.482	0.560
5 layers of Au NPs	0.488	5.192	29.620	0.750

藉由建立表面等离子体共振所引起的光电转换效率现象的模型,能更好了解太阳能转换效率机制,未来可用于提升等离子体激活太阳能电池的效率。

4　结　论

在可见光波长下,因金纳米粒子表面等离子体和 510 ~ 580 nm 光子耦合并分离电荷。为了增加光电电流的强度,利用迭层的方式在二氧化钛薄膜上制造多层层状金纳米粒子。光电转换效率随厚度的增加而提升。金纳米粒子于二氧化钛表面层层堆积,光电转换效率可达 0.75%。在经过优化之后,贵重金属的纳米粒子可能成为取代太阳能电池中的染料,而在未来成为表面等离子体激活太阳能电池及等离子体太阳能电池。

参考文献:

[1] HUANG X Q, TANG S H, MU X L, *et al.*. Freestanding palladium nanosheets with plasmonic and catalytic properties[J]. *Nat. Nanotechnol*, 2011, 6:28-32.

[2] KABASHIN A V, EVANS P, PASTKOVSKY S, *et al.*. Plasmonic nanorod metamaterials for biosensing, plasmonic-metal nanostructures for efficient conversion of solar to chemical energy[J]. *Nat. Mater.*, 2009, 8:867-871.

[3] LI H B, LI F Y, HAN C P, *et al.*. Highly sensitive and selective tryptophan colorimetric sensor based on 4,4-bipyridine-functionalized silver nanoparticles[J]. *Sens Actuat B Chem.*, 2009, 145:194.

[4] TIAN Y, SHI X, LU C Q, *et al.*. Charge separation in solid-state gold nanoparticles-sensitized photovoltaic cell[J]. *Electrochem. Commun.*, 2009, 11:1603-1605.

[5] CUEVAS-MUNIZ F M, GUERRA-BALCAZAR M, CASTANEDA F, *et al.*. Performance of Au and AuAg nanoparticles supported on Vulcan in a glucose laminar membraneless microfuel cell[J]. *J. Power Sources*, 2011, 196:5853.

[6] LU Y Z, WANG Y C, CHEN W. Silver nanorods for oxygen reduction: strong effects of protecting ligand on the electrocatalytic activity[J]. *J. Power Sources*, 2011, 196:3033.

[7] ZHOU H Q, QIU C Y, YU F, *et al.*. Thickness-dependent morphologies and surface-enhanced raman scattering of Ag deposited on n-Layer graphenes[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2011, 115:11348-11354.

[8] NIU B J, WU L L, TANG W, *et al.*. Enhancement of near-band edge emission of Au/ZnO composite nanobelts by surface plasmon resonance[J]. *Cry. Steng. Comm.*, 2011, 13:3678-3681.

[9] SU Y H, TU S L, TSENG S W, *et al.*. Influence of surface plasmon resonance on the emission intermittency of photoluminescence from gold nano-sea-urchins[J]. *Nanoscale*, 2010, 2:2639-2646.

[10] BABA A, AOKI N, SHINBO K, *et al.*. Grating-coupled surface plasmon enhanced short-circuit current in organic thin-film photovoltaic cells[J]. *ACS Appl. Mater. Interf.*, 2011, 3:2080-2084.

[11] FURUBE A, DU L, HARA K, *et al.*. Ultrafast plasmon-induced electron transfer from gold nanodots into TiO_2 nanoparticles[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2007, 129:14852.

[12] LINIC S, CHRISTOPHER P, INGRAM D B. Plasmonic-metal nanostructures for efficient conversion of solar to chemical energy[J]. *Nat. Mater.*, 2011, 10:911.

[13] TIAN Y, TATSUMA T. Plasmon-induced photoelectrochemistry at metal nanoparticles supported on nanoporous TiO_2[J]. *Chem. Commun.* (*Camb*), 2004(16):1810-1811.

[14] TIAN Y, TATSUMA T. Mechanisms and applications of plasmon-induced charge separation at TiO_2 films loaded with gold nanoparticles[J]. *J Am Chem Soc*, 2005, 127:7632.

[15] Two highly dispersed metallic oxides by the aerosil process[J]. *Degussa Technical Bulletin*, 1990(56):3-21.

[16] ZHU M, AIKENS C M, HOLLANDER F J, *et al.*. Correlating the crystal structure of a thiol-protected Au25 cluster and optical properties[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2008, 130:5883.

[17] FURUBE A, DU L, HARA K, *et al.*. Ultrafast plasmon-induced electron transfer from gold nanodots into TiO_2 nanoparticles[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2007, 129:14852.

[18] MCFARLAND E W, TANG J. A photovoltaic device structure based on internal electron emission[J]. *Nature*, 2003, 421:616.

[19] BISQUERT J, CAHEN D, HODES G, *et al.*. Physical chemical principles of photovoltaic conversion with nanoparticulate, mesoporous dye-sensitized solar cells[J]. *J. Phys. Chem. B*, 2004, 108:8106.

[20] WANG Q, ITO S, GRATZEL M, *et al.*. Characteristics of high efficiency dye-sensitized solar cells[J]. *J. Phys. Chem. B*, 2006, 110:25210.

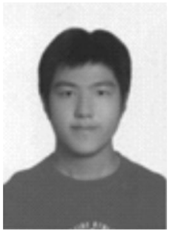
[21] SMESTAD G P. *Optoelectronics of Solar Cells*[M]. Washington, DC: SPIE, 2002.

[22] WURFEL P. *Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts*[M]. Weinhein: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.

作者简介：

苏彦勋(1981—)，男，台湾高雄人，助理教授，2010 年于台湾成功大学获得博士学位，主要从事生物发光二极管、电浆材料、生物能源的太阳能电池、能源材料、计算材料方面的研究。E-mail：yhsu@mail.ncku.edu.tw

姚芊瑜(1989—)，台湾高雄人，硕士，2013 年于台湾东华大学获得硕士学位，主要从事能源材料方面的研究。E-mail：qiany.yao@gmail.com



柯沅锋(1985—)，台湾彰化人，硕士，2013 年于台湾东华大学获得硕士学位，主要从事能源材料方面的研究。E-mail：person.wade@gmail.com

徐嘉妘(1990—)，台湾花莲人，硕士研究生，主要从事能源材料方面的研究。E-mail：xjy@gmail.com

蔡士良(1986—)，台湾高雄人，硕士，2013 年于台湾东华大学获得硕士学位，主要从事能源材料方面的研究。E-mail：ted7229885@hotmail.com

龚柏谚(1990—)，台湾高雄人，硕士研究生，主要从事能源材料方面的研究。E-mail：poyen0510@gmail.com