

# 单晶硅太阳能电池防电势诱导衰减镀膜工艺分析

马新尖<sup>1</sup> 林涛<sup>2</sup> 冯帅臣<sup>3</sup>

<sup>1</sup>拉萨师范高等专科学校信息技术系, 西藏 拉萨 850000

<sup>2</sup>西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

<sup>3</sup>扬州鑫晶光伏科技有限公司, 江苏 扬州 225653

**摘要** 电势诱导衰减(PID)能够导致光伏组件功率在较短时间内出现大幅衰退,而PID现象的产生主要和封装材料及太阳能电池表面处理等方面有关。针对太阳能电池片的镀膜工艺设计实验,测试并分析了正常工艺和防PID工艺制作的SiN<sub>x</sub>减反射膜厚度、折射率、反射率、镀膜前后的少数寿命以及单晶硅成品电池片的电学特性。结果表明,相比标准工艺,虽然防PID工艺制作的单晶硅太阳能电池具有较好的钝化效果,但在整个光谱相应范围减反射效果较差是导致转化效率较低的主要原因。电致发光测试表明,防PID工艺并没有给单晶硅太阳能电池带来额外的缺陷,但是防PID工艺制作的太阳能电池在组件应用时却具有抵抗PID现象及防止金属离子对电池产生破坏的能力。

**关键词** 光电子学;电势诱导衰减;SiN<sub>x</sub>减反射膜;单晶硅太阳能电池;转换效率

中图分类号 TN36

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.041601

## Analysis of Mono-Crystalline Silicon Solar Cells Preventing PID Coating Process

Ma Xinjian<sup>1</sup> Lin Tao<sup>2</sup> Feng Shuaichen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Information Technology Department, Lhasa Normal College, Lhasa, Tibet 850000, China

<sup>2</sup>Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

<sup>3</sup>Yangzhou Xinjing Photovoltaic Technology Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225653, China

**Abstract** Power loss is observed in photovoltaic modules resulting from the potential induced degradation (PID), which is mainly related with packaging glasses, glue film and surface treatment of solar cell. The coating process of solar cell to design the experiment is focused on. Thickness, refractive index, reflectance, minority carrier lifetime of the pre and post coating of silicon nitride (SiN<sub>x</sub>) anti-reflection coatings of machining standard process and preventing PID process and electrical characteristics of the solar cell are tested and analyzed. The results show that the PID process of mono-crystalline silicon solar cells have good passivation effect, but the anti-reflection effect of the poor is the main cause lead to the low conversion efficiency in the whole spectral range. Electro luminescence defect tests show that the preventing PID process does not bring additional defects to the mono-crystalline silicon solar cell, but solar cells are made by the preventing PID process when it is applied in modules have a resisting potential induced degradation phenomenon and preventing damage to solar cells from metal ion, compared with the standard process.

**Key words** optoelectronics; potential induced degradation; silicon nitride anti-reflection coating; mono-crystalline solar cell; conversion efficiency

**OCIS codes** 160.6000; 160.6030; 220.4840; 350.6050

## 1 引言

随着全球气候变暖以及能源危机的日益突出,清洁能源太阳能作为可再生能源已受到人们的广泛关注。虽然太阳能电池可直接将太阳能转换为电能,具有很多得天独厚的优势,但其转换效率偏低、应用成本高

收稿日期: 2014-11-12; 收到修改稿日期: 2014-11-19; 网络出版日期: 2015-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(61106043)

作者简介: 马新尖(1985—),女,硕士,助教,主要从事半导体光伏电池和器件等方面的研究。

E-mail: 932594765@qq.com

及稳定性较差一直是影响其全球大规模应用的主要瓶颈。近年来,电势差引起的衰减,又叫电势诱导衰减(PID),导致光伏组件在使用中效率衰减大而备受业界人士的关注。因此,为了防止PID现象的发生,对太阳能电池组件及太阳能电池片制作工艺的研究显得尤为重要。

Hoffman等<sup>[1]</sup>在高压潮湿的环境中对光伏组件的稳定性进行了测试研究;Dhere等<sup>[2-3]</sup>在炎热和潮湿环境下,研究了系统偏压对漏电流的影响,结果表明在户外潮湿环境下薄膜模块的漏电流基本保持在0.1~8 mA的范围内,同时,Dhere等<sup>[4]</sup>还研究了金属离子在组件模块中是如何进行迁移的;Swanson等<sup>[5]</sup>在背接触n型晶硅太阳能电池组件中提出表面极化现象,并发现这种现象具有可逆性;美国国家能源部可再生能源实验室和Solon公司证实了无论组件采用何种技术的p型晶硅电池片<sup>[6-8]</sup>,组件在负偏压下都有PID的风险;Naumanna等<sup>[9-10]</sup>采用扫描电镜/透射电镜/二次离子质谱/电子束诱导电流对出现PID现象的晶硅太阳能电池表面微结构进行了分析,结果表明电子分流与金属Na<sup>+</sup>在太阳能电池减反射膜表面的富集有关。也有学者认为PID现象的出现不仅与组件所处的环境及所使用的封装材料有关<sup>[11-12]</sup>,太阳能电池片减反射膜的厚度、折射率大小等以及硅片质量也是导致PID现象出现的重要原因。所以,降低和防止PID现象的出现,对太阳能电池制作工艺的研究具有一定的意义。

结合以上研究结果,本文主要从工艺角度出发,针对太阳能电池减反射膜防PID现象工艺与标准化工艺设计多组实验,对每一组实验,均测试了电池片的开路电压、短路电流、填充因子、光电转换效率、少数载流子寿命、减反射膜厚度和折射率、反射率以及电致发光(EL)图像等性能参数,在此基础上,通过数据统计,分析了防PID现象工艺和标准工艺对太阳能电池片光电转换效率以及对组件输出功率衰减的影响。

## 2 实验

### 2.1 电池制作工艺

实验中除等离子体化学气相沉积(PECVD)镀膜外,均采用标准化的单晶硅太阳能电池制作工艺。首先将衬底大小为125 mm×125 mm,表面积为154.828 cm<sup>2</sup>,厚度约为(200±20) μm,电阻率约为1~3 Ω·cm的p型单晶硅片放入含有添加剂、NaOH和乙醇的碱性溶液中进行表面制绒,减小硅片表面的光反射;然后对硅片进行磷扩散形成方块电阻约为85 Ω左右的n型发射结;采用等离子体刻蚀技术去掉边沿因扩散形成的pn结,以防周边短路,并采用HF去掉磷硅玻璃;采用标准化和防PID现象两种不同PECVD工艺制作氮化硅(SiN<sub>2</sub>)减反射膜;最后通过丝网印刷制作背电极、Al背场及正面栅电极,经烧结形成良好的欧姆接触。

实验中采用椭圆偏振仪测试太阳能电池减反射膜的厚度及折射率;使用Semilab的微波光电导衰减法(μ-PCD)对镀膜前后的半成品电池片进行少子寿命的测试;通过太阳能电池测试仪对太阳能电池电学特性进行测试;采用EL缺陷测试仪对标准工艺和防PID工艺太阳能电池片进行EL测试;通过标准八度角积分反射率测试仪对反射率进行测试。

### 2.2 实验方案

表1按实验顺序给出了a、b、c三组工艺实验方案,实验中除PECVD采用不同的工艺进行氮化硅减反射膜的制作之外,其余均采用标准工艺完成太阳能电池片的制作,其中防PID镀膜工艺NH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub>采用50/90的流量百分比;而标准镀膜工艺NH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub>采用70/65的气体流量百分比;表中c组与a组实验工艺相同是为了在切换工艺条件后测试防PID工艺的稳定性。

表1 工艺实验方案

Table 1 Schematic of the process experiments

Group	Surface texture	Diffusion	PECVD	Screen-printing	Sintering process	Testing
a	NaOH、 Alcohol、Addictive	Phosphorus diffusion (850 °C)	Preventing PID process	Print Al-BSF、 rear electrode、 front gate electrode	Chain sintering process	I-V testing
b			Standard process			
c			Preventing PID process			

### 3 结果与讨论

根据表 1 进行实验,测试了不同工艺下  $\text{SiN}_x$  减反射膜的厚度、折射率、反射率、烧结前后的少子寿命以及成品电池片的电学特性。

#### 3.1 折射率及膜厚对比分析

图 1(a),(b)分别给出了标准工艺和防 PID 工艺  $\text{SiN}_x$  膜厚及折射率分布。其中标准 PECVD 镀膜工艺  $\text{NH}_3/\text{SiH}_4$  气体流量比为 7000:650,而防 PID-PECVD 镀膜工艺  $\text{NH}_3/\text{SiH}_4$  气体流量比为 5000:900。由图可知,标准工艺制作的  $\text{SiN}_x$  减反射膜平均膜厚及折射率分别为 78.5 nm 和 2.09,而防 PID 工艺制作的  $\text{SiN}_x$  减反射膜平均膜厚及折射率分别为 76 nm 和 2.135;流量比越小折射率越大,薄膜的钝化效果越好,这是因为折射率越大,薄膜中 Si 的含量越高, $\text{SiN}_x$  的晶格结构与基底 Si 的结构更加匹配,使得  $\text{SiN}_x$ -Si 界面的界面态数量减少,有效复合中心数量减少,有助于表面钝化的提高<sup>[13]</sup>;反之,流量比越大折射率越小,薄膜的减反射效果越好,透过薄膜进入 Si 中的光子数将越多,从而激发更多的电子-空穴对,利于短路电流的提高。薄膜对光谱的吸收为<sup>[14]</sup>

$$A(\lambda) = A_0(\lambda)\exp[-a(\lambda)d], \quad (1)$$

式中  $A(\lambda)$  为薄膜对光的吸收,  $A_0(\lambda)$  为 Si 对光的吸收,  $a(\lambda)$  为吸收系数,  $d$  为薄膜厚度。

在同一波长下,薄膜越厚,对光的吸收越大,透过薄膜进入 Si 中的光子数将不一定增多。

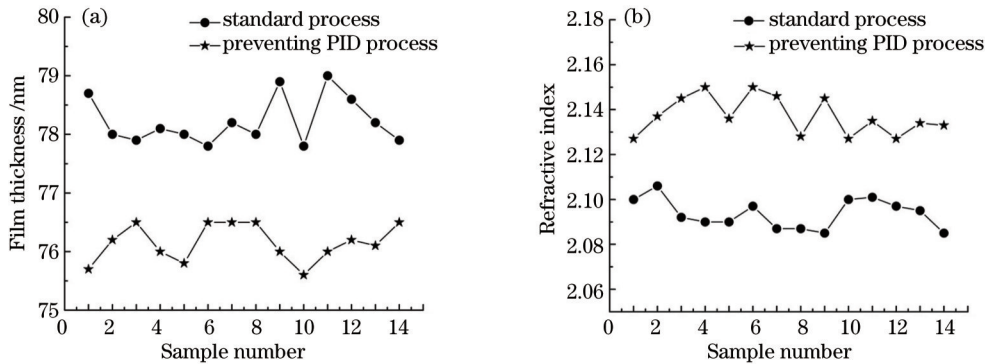


图 1 标准工艺和防 PID 工艺  $\text{SiN}_x$ (a)膜厚及(b)折射率分布

Fig.1 Distributions of (a) thickness and (b) refractive index for standard process and preventing PID process

#### 3.2 反射率对比分析

图 2 给出了标准工艺和防 PID 工艺太阳能电池样品反射率测试曲线。由图可知,当波长在 300~450 nm 时,标准工艺和防 PID 工艺样品平均反射率分别为 15.2%和 11.54%,防 PID 工艺样品反射率明显低于标准工艺样品反射率;由 2.1 节的分析可知,防 PID 工艺制作的  $\text{SiN}_x$  晶格结构相比标准工艺更接近于 Si 基底的结构,有助于提高表面钝化效果,而在短波段,光激发的电子-空穴对主要分布于太阳能电池的浅表面附近,说明在 300~450 nm 波段的光激发的电子-空穴对有利于防 PID 工艺制作的太阳能电池短路电流的提高;当波长在 450~1100 nm 时,标准工艺和防 PID 工艺样品平均反射率分别为 2.32%和 4.08%,标准工艺样品减反射效果优于防 PID 工艺样品;而当在 300~1100 nm 整个波长范围时,标准工艺和防 PID 工艺样品平均反射率分别为

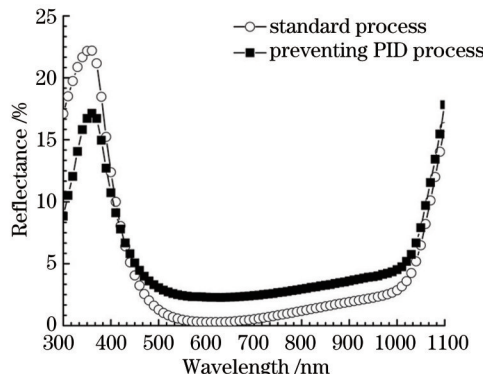


图 2 标准工艺和防 PID 工艺太阳能电池样品反射率测试曲线

Fig.2 Test reflectance curves of standard process and preventing PID process solar cell samples

4.86%和5.55%,标准工艺样品减反射效果仍然优于防PID工艺样品;由此可知,虽然防PID工艺制作的太阳能电池在短波段减反射效果好,但是在中长波段(约占整个光谱响应波段的81%)以及整个光谱响应范围内,防PID工艺制作的太阳能电池减反射效果都不如标准工艺,这将不利于短路电流的提高。结合3.1节分析可知, $\text{SiN}_x$ 膜厚度及折射率的变化,对其减反射光谱特性的影响较大<sup>[15]</sup>。

### 3.3 少子寿命测试结果分析

表2给出了标准工艺和防PID工艺镀膜前和烧结后少子寿命测试结果。由表2可知,镀膜前标准工艺和防PID工艺半成品电池片样品少子寿命分别为8.9  $\mu\text{s}$ 和8.7  $\mu\text{s}$ ,无明显区别。经镀膜并烧结,防PID工艺制作的半成品电池片少子寿命为17.7  $\mu\text{s}$ ,明显高出正常工艺制作的半成品电池片(正常工艺少子寿命为15  $\mu\text{s}$ )少子寿命约3  $\mu\text{s}$ ;可见防PID工艺制作的 $\text{SiN}_x$ 膜具有更好的钝化效果,有助于开路电压的提高,一方面,经过烧结后防PID工艺制作的 $\text{SiN}_x$ 膜将会释放出更多的H而到达Si的表面及体内,减少Si表面及体内的缺陷,达到减少有效复合中心的目的,这与3.1节的分析结果一致;另一方面,由文献[16]可知, $\text{Na}^+$ 在外电场的作用下向 $\text{SiN}_x$ 膜表面迁移并富集是导致太阳能电池组件PID现象产生的主要原因, $\text{Na}^+$ 的富集导致减反射膜表面态数量的增加,有效复合中心数量的增加,防PID工艺制作的 $\text{SiN}_x$ 减反射膜具有好的钝化效果,可达到减少因 $\text{Na}^+$ 的富集导致减反射膜表面态数量增加的目的,从而起到预防PID现象发生的作用。

表2 标准工艺和防PID工艺太阳能电池样品少子寿命测试结果

Table 2 Minority carrier lifetime of standard process and preventing PID process solar cell samples

	Average minority carrier lifetime before coating film / $\mu\text{s}$	Average minority carrier lifetime after sintering / $\mu\text{s}$
Standard process	8.9	15
Preventing PID Process	8.7	17.7

### 3.4 电学测试结果分析

表3给出了太阳能电池电学特性测试结果。由测试结果可知,a组太阳能电池平均转化效率为19.030%,而b组的平均转化效率为19.082%,相比b组,a组的转化效率降低了0.27%。结合前面的分析可知,相比标准工艺,虽然防PID工艺制作的 $\text{SiN}_x$ 膜有着较好的钝化效果,且 $\text{SiN}_x$ 膜厚度较薄,薄膜对光的吸收较少,但其在整个光谱响应范围减反射效果较差,使得透过 $\text{SiN}_x$ 膜进入Si中的光子数降低,激发的电子-空穴对数目减少,导致短路电流的降低,最终导致转化效率有所降低,但降低幅度较小,这是因为,虽然标准工艺制作的太阳能电池在中长波段反射率低于防PID工艺,但是随着波长的增加,晶硅太阳能电池对光的吸收深度越深,那么,较长波段的光有可能不被电池吸收利用而浪费<sup>[17-18]</sup>。从开路电压的测试结果来看,防PID工艺和标准工艺制作的太阳能电池并无明显差异。在先后完成防PID工艺实验和正常工艺实验之后,再次进行了防PID工艺的验证,对比b、c两组测试结果可知,c组太阳能电池短路电流明显降低,而开路电压相同,转化效率衰减在5%以内,且具有和a组相一致的测试结果,说明防PID工艺具有较好的稳定性。

表3 太阳能电池电学特性测试结果

Table 3 Electrical characteristics of the solar cell

	$\eta$ /%	$I_{sc}$ /A	$U_{oc}$ /V	$F_F$ /%	$R_s$ / $\Omega$	$R_{sh}$ / $\Omega$
a	19.030	5.8782	0.6366	78.736	0.0031834	605
b	19.082	5.8849	0.6370	78.814	0.0033563	588
c	19.031	5.8670	0.6370	78.843	0.0030617	670

### 3.5 EL测试分析

工艺参数的改变可能引起太阳能电池出现不同程度的缺陷,而缺陷能极大地影响太阳能电池的光电转化效率和使用寿命,因此,对不同工艺制作的太阳能电池进行EL缺陷测试尤为重要。图3为标准工艺和防PID工艺太阳能电池EL测试图,图3(a)较图3(b)图像偏暗,是由于EL缺陷检测仪灯光亮度所致。由图可知,与标准工艺制作的太阳能电池相比,经过改进后的防PID工艺制作的太阳能电池EL测试图片并无明显区别,说明改动过的防PID工艺并没有给单晶硅太阳能电池带来额外的缺陷,但是防PID工艺制作的太阳能电池片在组件应用时却具有抵抗电位诱导衰减现象及防止金属离子对电池破坏的能力<sup>[16]</sup>。



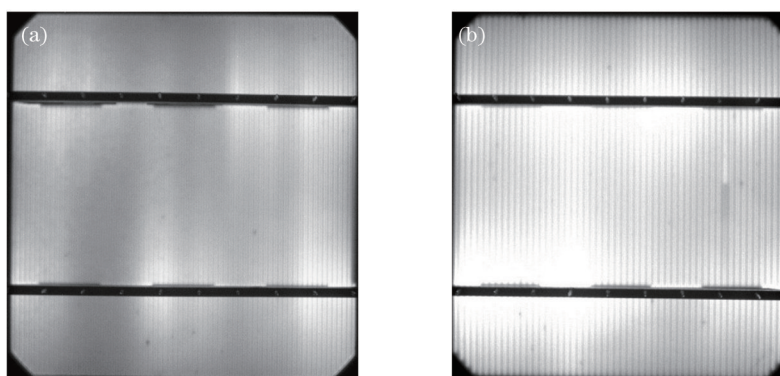


图3 (a)标准工艺和(b)防PID工艺太阳能电池EL图

Fig.3 EL images of (a) standard process and (b) preventing PID process solar cells

## 4 结 论

结合目前太阳能电池组件应用中出现的PID现象,针对太阳能电池制作工艺设计实验,对标准工艺和防PID工艺制作的太阳能电池及减反射膜进行对比分析,结果表明,相比标准工艺,防PID工艺制作的 $\text{SiN}_x$ 减反射膜厚度较薄,折射率较大,在整个光谱相应范围具有较差的减反射特性,由少子寿命测试结果可知,防PID工艺制作的 $\text{SiN}_x$ 具有较好的钝化效果;但较好的钝化效果并没有给防PID工艺制作的太阳能电池带来更高的开路电压,而较差的减反射特性却使得短路电流有略微降低;EL测试表明,防PID工艺并没有给单晶硅太阳能电池带来额外的缺陷,虽然转化效率有所衰减,但是防PID工艺制作的太阳能电池在组件应用时却具有抵抗PID现象及防止金属离子对电池破坏的能力。

## 参 考 文 献

- 1 A R Hoffman, R G Ross, Jr. Environmental qualification testing of terrestrial solar cell modules [J]. 13th IEEE PVSC, 1978. 835-842.
- 2 N G Dhere, V V Hadagali, S M Bet. Leakage currents pathways, magnitudes and their correlaiton to numidity and temperature in high voltage biased thin film PV modules [J]. 19th EUPVSEC, 2004: 2170.
- 3 N G Dhere, S M Bet, H P Patil. High-voltage bias testing of thin-film PV modules [J]. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003, 2: 1923-1926.
- 4 N G Dhere, M B Dandit. Study of delamination in acceleration tested PV modules [C]. 20th EUPVSEC, 2001. 572.
- 5 R Swanson, M Cudzinovic, D DeCeuster, *et al.*. The surface polarization effect in high-efficiency silicon solar cells [J]. 15th PVSC, 2005. 21-25.
- 6 Peter Hacke, Kent Terwilliger, Ryan Smith, *et al.*. System voltage potential-induced degradation mechanisms in PV modules and methods for test [J]. 37th IEEE PVSC, 2011. 1-7.
- 7 P Hacke, M Kempe, K Terwilliger, *et al.*. Characterization of multicrystalline silicon modules with system bias voltage applied in damp heat [J]. 25th EUPVSEC, 2010. 3760-3765.
- 8 J Berghold, O Frank, H Hoehne, *et al.*. Potential induced degradation of solar cells and panels [C]. 25th EUPVSEC, 2010. 3753-3759.
- 9 Volker Naumann, Dominik Lausch, Stephan Großer, *et al.*. Microstructural analysis of crystal defects leading to potential-induced degradation (PID) of Si solar cells [J]. Energy Procedia, 2013, 33. 76-83.
- 10 Volker Naumann, Dominik Lausch, Andreas Graff, *et al.*. The role of stacking faultsfor the formation of shunts during potential-induced degradation of crystalline Si solar cells [J]. Phys Status Solidi RRL, 2013, 7(5): 315-318.
- 11 Simon Koch, Christian Seidel, Paul Grunow, *et al.*. Polarization effects and tests for crystalline silicon cells [J]. 26th EUPVSEC, 2011.
- 12 泰通工业有限公司.一种抗电势诱导衰减的太阳能电池的制备工艺: 中国, 201310096087.2 [P]. 2013-06-19.
- 13 Fan Jinxing, Shi Zhengrong, Zhang Chunguang, *et al.*. Influence of double-layer  $\text{SiN}_x$  thin film deposited by PECVD on cell [J]. Advanced Semiconductor Manufacturing Technologies, 2012, 37(3): 192-196.

- 金凡星, 施正荣, 张光春, 等. PECVD 沉积双层  $\text{SiN}_x$  对太阳能电池性能的影响[J]. 半导体先进制造技术, 2012, 37(3): 192-196.
- 14 Li Zhonghua, Studies on the Double-Layered Anti-Reflective Coatings for Monocrystalline Silicon Solar Cells [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. 30.  
李中华. 晶硅太阳能电池双层减反射膜的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011. 30.
- 15 Fu Xiuhua, Sun Yingjie, Liu Dongmei, *et al.*. Study and fabrication of visible and infrared broadband antireflection coating [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0331002.  
付秀华, 孙英杰, 刘冬梅, 等. 可见与近红外宽带减反射膜的研制[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0331002.
- 16 Cao Peiliang. On the PID effect of crystal silicon solar cells [J]. Technology Wind, 2013, (14): 15.  
曹培亮. 浅谈晶体硅太阳能电池组件PID效应 [J]. 科技风, 2013, (14): 15.
- 17 Zhou Tao, Lu Xiaodong, Li Yuan, *et al.*. Upper surface anti-reflection coating on crystalline silicon solar cell [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 103101.  
周涛, 陆晓东, 李媛, 等. 晶硅太阳能电池上表面增透膜研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 103101.
- 18 Lu Huidong, Shen Hongjun, Li Lei, *et al.*. A structure design of the amorphous silicon single-junction thin-film solar cells for increasing sunlight absorption [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0831003.  
卢辉东, 沈宏君, 黎磊, 等. 一种增加单结非晶硅薄膜太阳能电池光吸收的结构设计[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0831003.

栏目编辑: 韩峰