



# 具有集成旁路二极管的晶体硅太阳能电池研究

陈开汉, 陈达明, 朱彦斌, 沈辉\*

中山大学太阳能系统研究所, 光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275

\* E-mail: shenhui1956@163.com

收稿日期: 2011-04-21; 接受日期: 2011-08-25

广东省重大科技专项(批准号: 2008A080800007)和广东省科学计划(批准号: 2009B011100002)资助项目

**摘要** 研究了将旁路二极管集成到晶体硅太阳能电池上的工艺. 采用丝网印刷的方法, 在晶体硅片局部区域印刷上合适的浆料, 经烧结后直接形成一个二极管, 其 p-n 结方向与主体太阳能电池的 p-n 结方向相反, 该二极管被用作旁路二极管, 接着采用激光刻槽工艺将二极管与主体电池隔离, 最后把多片集成了旁路二极管的太阳能电池封装成组件, 利用组件 I-V 测试仪进行不同遮挡条件下的测试. 实验结果表明, 集成在硅太阳能电池上的旁路二极管可以有效地稳定组件短路电流, 减少局部遮挡条件下组件输出功率的损失.

**关键词**

晶体硅太阳能电池  
旁路二极管  
集成旁路

## 1 引言

太阳能电池组件是光伏系统的重要组成部分, 组件工作的稳定性和可靠性直接影响到光伏系统的工作状态. 晶体硅太阳能电池组件是由多片晶体硅太阳能电池通过互连条串联或者并联组成的, 如果组件中的单体晶体硅太阳能电池由于阴影遮挡或者出现故障(例如焊接不良)而导致输出电流降低时, 与它串联的其他正常工作的太阳能电池的工作电流也会跟着下降, 极大地影响了组件的输出功率. 更严重的是, 由于串联的其他太阳能电池的正常工作, 出现问题的单体太阳能电池在较高的反向电压下开始发热, 长时间积累下来的高热量很容易造成太阳能电池的永久性损坏, 导致组件输出功率极大地下降<sup>[1, 2]</sup>.

为了解决上述问题, 目前晶体硅太阳能电池组件普遍采用的方法是在接线盒中接入旁路二极管, 每个旁路二极管与多片串联在一起的晶体硅太阳能电池并联起来, 当一串太阳能电池中的单片电池被遮挡或者出现故障时, 与该串太阳能电池并联的旁路二极管

会将流经此串太阳能电池的过量电流旁路, 防止对应太阳能电池的损坏<sup>[3]</sup>. 此方法的不足之处在于, 出现问题的单片太阳能电池会造成整一串太阳能电池被旁路, 组件输出功率损失较大.

典型的太阳能电池组件是为多片串联的太阳能电池并联上一个旁路二极管, 如图 1 所示.

从图 1 可以看出, 该太阳能电池组件是由 36 片太阳能电池串联而成, 其中每 18 片太阳能电池并联一个旁路二极管, 当同一串的 18 片电池中出现局部遮挡时, 旁路二极管会将这 18 片电池旁路, 组件的工作电压

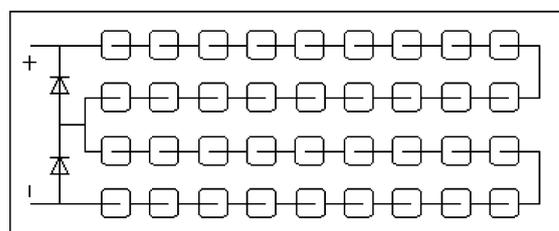


图 1 典型的太阳能电池组件

会发生较大的损失, 具体为 18 片电池的工作电压的损失, 以及一个旁路二极管的压降损失, 组件工作电压的损失使得输出功率发生较大的下降。

如果为每一片太阳能电池集成上一个旁路二极管, 二极管的旁路作用就可以精确到每一片太阳能电池, 这样不仅可以保护到每一片电池, 而且可以减少发生局部遮挡时组件的功率损失。

集成旁路二极管在化合物半导体太阳能电池、多结太阳能电池上的应用非常普遍<sup>[4, 5]</sup>, 但是在晶体硅太阳能电池上的应用很少, 国内目前查不到相关的文献报道, 国外在这方面的文献也较少。其中具有代表性的是新南威尔士大学 Green 团队采用蒸镀金属铝及烧穿 p-n 结等方式将旁路二极管制作在晶体硅太阳能电池表面, 且直接通过主栅与主体太阳能电池并联<sup>[6]</sup>。但此方案采用基体电阻作为二极管与主体太阳能电池的隔离带, 也为太阳能电池引入了多余的并联电阻, 影响了电池正常工作, 降低了电池的填充因子 *FF*。采用这种电池制作的组件, 测试结果表明集成的旁路二极管能够自动保护太阳能电池, 提高局部遮挡下组件阵列的输出功率<sup>[7, 8]</sup>。

本实验主要通过丝网印刷的方法将旁路二极管集成到单片晶体硅太阳能电池上。利用该种电池制备的组件在局部遮光条件下表现出明显的旁路效果, 而且能有效降低由于局部遮挡引起的功率损失。

## 2 实验内容

### 2.1 太阳能电池制备过程和集成旁路二极管的表征

本实验采用丝网印刷合适浆料与烧结的方法来制作旁路二极管。其具体制备流程如下。

1) 按照常规 p 型单晶硅太阳能电池制造工艺, 如图 2 所示, 制备出扩散后且单面镀有减反膜的 p 型单晶硅片。

2) 丝网印刷流程图见图 3, 首先在 p 型单晶硅片的背面丝网印刷银铝浆作为太阳能电池的背面电极。

3) 在 p 型单晶硅片的背面丝网印刷铝浆作为太阳能电池的背面电极。

4) 在 p 型单晶硅片的正面丝网印刷银铝浆作为旁路二极管的正面电极。

5) 在 p 型单晶硅片的正面丝网印刷铝浆作为旁路二极管的正面电极。

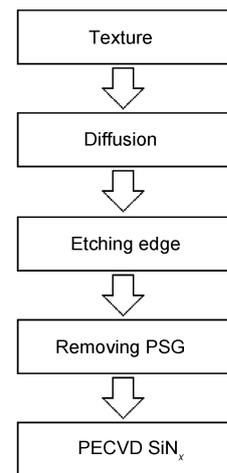


图 2 常规 p 型单晶硅太阳能电池制造工艺

6) 在 p 型单晶硅片的背面丝网印刷银浆作为旁路二极管的背面电极。

7) 在 p 型单晶硅片的正面丝网印刷银浆作为太阳能电池的正面电极。

8) 高温烧结形成具有旁路二极管的 p 型单晶硅太阳能电池。

9) 将太阳能电池固定在激光工作台上, 采用波长 1064 nm 的激光器, 在旁路二极管四周预留区域扫描 18 mm×18 mm 的方形进行刻槽使其与主体电池隔离。

本实验采用直流电压电流源以及红外热像仪的方法对太阳能电池及集成旁路二极管进行表征。在激光隔离前后, 用直流电压电流源分别测得太阳能电池在反向偏压下的漏电流、旁路二极管在正向与反向偏压下的 *I-V* 特性, 同时用红外热像仪记录电池表面的发热情况。

### 2.2 组件连接方案与测试

在组件中, 旁路二极管通过互连条与相邻的另一片太阳能电池并联, 即硅片 A 上的二极管与硅片 B 上的主体太阳能电池并联, 硅片 B 上的二极管与硅片 C 上的主体太阳能电池并联。

图 4 是组件的连接方案。图 5 是对应的电路连接实物图。

本实验采用 10 片具有集成旁路二极管的太阳能电池串联成组件, 当没有连接旁路二极管时, 对组件中的一片太阳能电池进行局部遮挡, 遮挡比例(遮挡面积与该片电池面积的比值)从 0%, 25%, 50%, 75%, 100% 逐步增加, 测得组件的 *I-V* 特性曲线。同理, 当连接

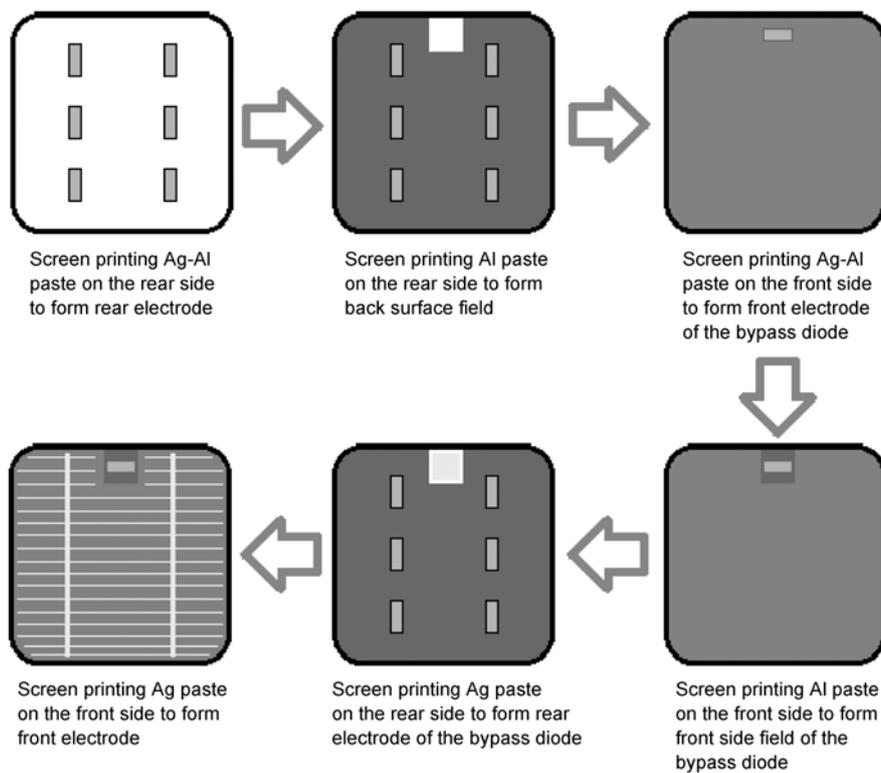


图3 集成旁路二极管的太阳能电池印刷流程

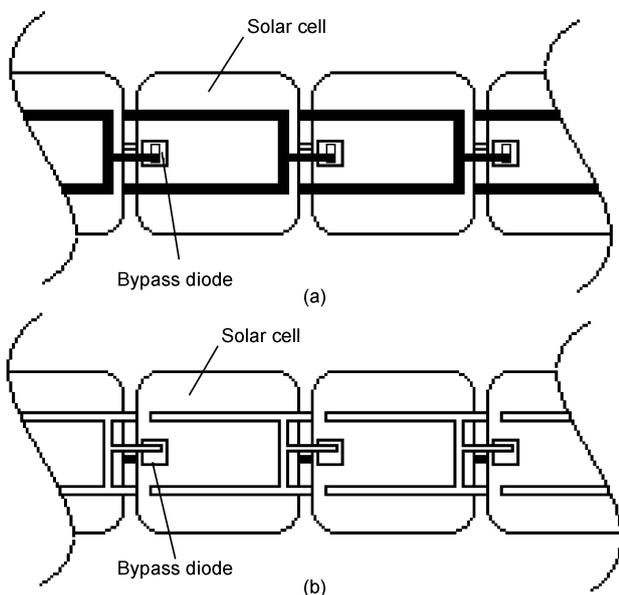


图4 组件中旁路二极管电路连接方案  
(a) 正面; (b) 背面

了旁路二极管之后, 测得组件在不同遮挡比例下的  $I-V$  特性曲线.

### 3 实验结果与讨论

具有集成旁路二极管的太阳能电池如图6所示, 其中  $18\text{ mm} \times 18\text{ mm}$  的方形区域为集成的旁路二极管.

在太阳能电池正面  $n^+$  层印刷含铝(p型杂质剂)的浆料, 烧结时铝浆会烧穿  $\text{SiN}_x$  薄膜并与硅形成铝硅合金, 从而在太阳能电池正面形成局部的  $p^+$  层. 因此, 二极管与太阳能电池的交界面存在  $p^+$  层与  $n^+$  层形成的隧道结, 它产生的漏电流会影响太阳能电池正常工作. 为了解决上述问题, 本实验进一步采用激光在旁路二极管的四周刻槽, 将二极管四周的  $n^+$  区划穿, 从而将其与太阳能电池隔离.

激光隔离前后, 太阳能电池在反向偏压下的红外热像如图7所示.

从图7可以看出, 未经激光隔离的电池在集成旁路二极管区域产生较为严重的漏电; 经激光隔离后, 集成旁路二极管区域的漏电现象得到了消除. 这表明激光可以有效隔离集成旁路二极管的  $p^+$  层与电池的  $n^+$  层, 从而避免了隧道结漏电的发生.

图8是反向偏压下太阳能电池的漏电流测试结果.

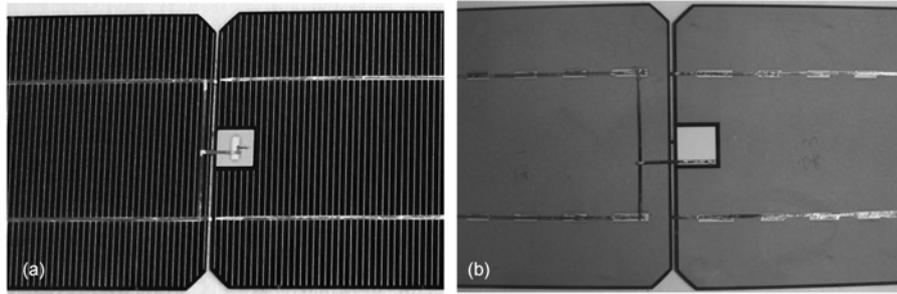


图5 组件中旁路二极管的电路连接实物图  
(a) 组件正面; (b) 组件背面

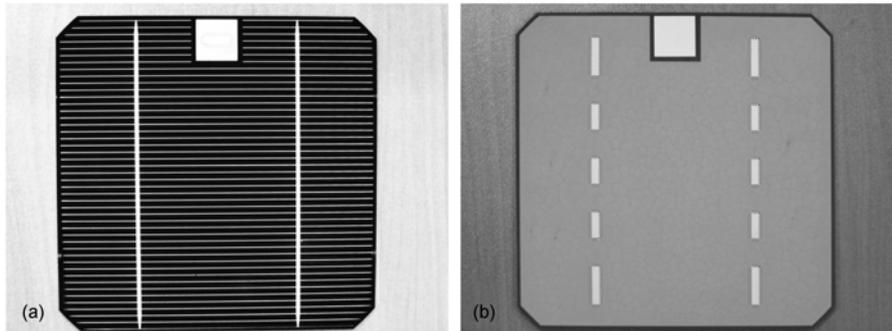


图6 具有集成旁路二极管的太阳电池  
(a) 正面; (b) 背面

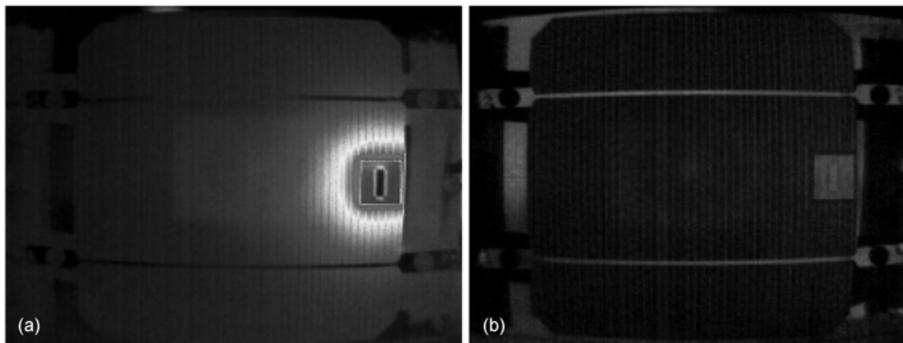


图7 反向偏压下的太阳电池红外热像  
(a) 激光隔离前(-3.0 V, 0.57 A); (b) 激光隔离后(-3.0 V, 0.04 A)

实验结果表明, 激光隔离旁路二极管可以有效地消除隧道结造成的漏电影响, 大大降低了反偏压下的太阳电池的漏电流, 保证太阳电池正常工作.

上面的实验表明激光隔离有利于太阳电池正常工作. 下面的实验将证明隔离对旁路二极管正常工作也是必要的. 隔离前后旁路二极管的  $I-V$  特性测试结果见图 9.

图 9 的测试结果表明, 激光隔离后的旁路二极管

反偏压下的漏电流显著下降, 二极管的单向导电性能得到显著的提高, 如图 9(b)所示. 由于集成旁路二极管在组件中只与一片电池并联, 其最大反向偏压等于电池开路电压(小于 0.7 V), 因此反向漏电流低于 10 mA, 对太阳电池正常工作几乎没有影响.

本实验采用 10 片具有集成旁路二极管的太阳电池串联成组件, 测得无任何遮挡下组件的  $I-V$  特性参数如表 1 所示.

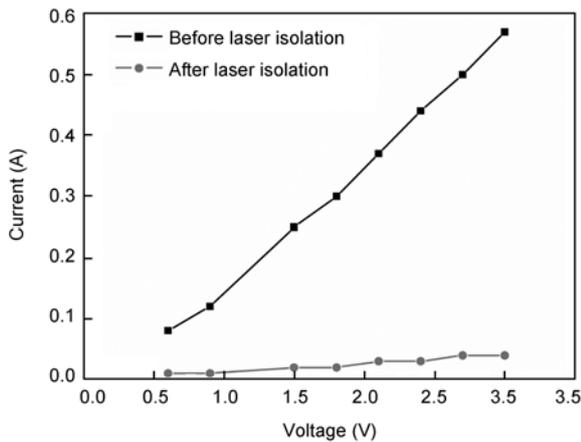


图8 激光隔离前后反向偏压下太阳能电池的漏电流

表1 无遮挡下的组件 I-V 特性参数

$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	FF (%)	$P_m$ (W)
5.72	6.03	59	20.35

当没有连接旁路二极管时, 测得组件的  $I-V$  特性曲线如图 10(a)所示.

当连接了旁路二极管以后, 测得组件在不同遮挡比例下的  $I-V$  特性曲线如图 10(b)所示.

从图 10(a)可以明显看出, 随着遮挡比例的增大, 没有连接集成旁路二极管的组件的短路电流  $I_{sc}$  出现明显地下降. 而开路电压  $V_{oc}$  在 100%遮挡时才出现明显下降, 即损失了一片电池的电压, 约 0.6 V. 组件  $I-V$  曲线发生显著的整体下移, 输出功率不断下降.

图 10(b)表明, 连接了集成旁路的组件的短路电流  $I_{sc}$  几乎不变, 证明了旁路二极管对被遮挡的太阳能电池起到很好的旁路作用. 开路电压  $V_{oc}$  变化情况与没有接二极管的组件类似. 在遮挡情况下组件  $I-V$  曲线出现“双台阶状”, 在低电压区(小于 3.5 V)曲线出现第一个台阶, 4 V 开始则是第二个台阶. 在相同的遮挡比例下, “双台阶状”的  $I-V$  曲线包围的面积比无

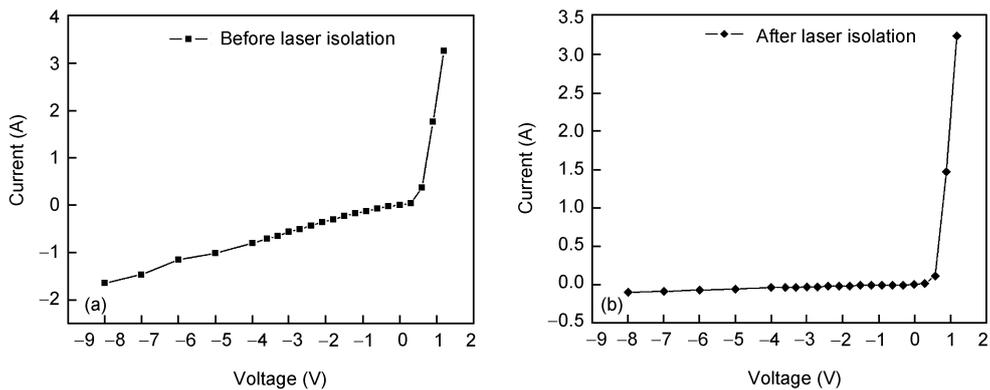


图9 激光隔离前后旁路二极管的 I-V 特性曲线

(a) 激光隔离前; (b) 激光隔离后

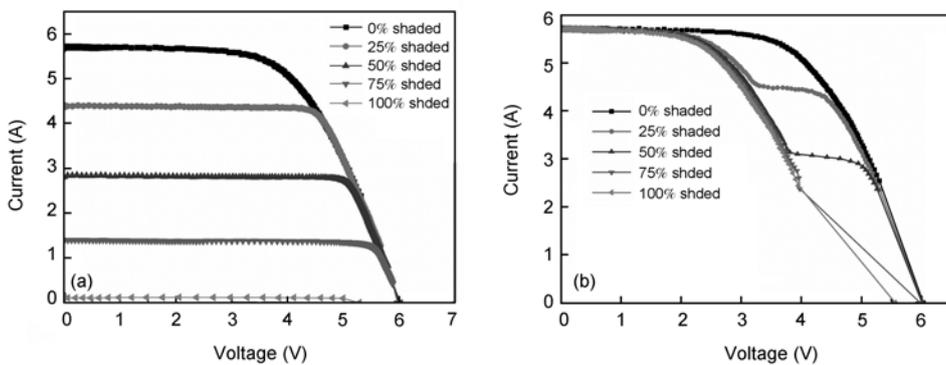


图10 组件在不同遮挡情况下的 I-V 特性

(a) 没有连接集成旁路二极管; (b) 连接了集成旁路二极管

旁路二极管组件  $I-V$  曲线的面积大得多, 说明连接了旁路二极管后, 组件发生遮挡时功率损失的幅度变小.

为了更好地说明上述情况, 绘制了是否连接旁路二极管的组件  $I_{sc}$ ,  $P_m$  随遮挡比例变化的曲线, 见图 11 和 12.

被遮挡的太阳电池, 随着遮挡比例的增大, 它的短路电流线性下降, 而开路电压变化很小. 当它与其他电池串联成组件时, 由于失配现象, 组件的短路电流由这片被遮挡的电池决定, 因此没有连接旁路二极管组件的短路电流也会随遮挡比例增大出现线性下降, 见图 11, 而组件输出功率由于短路电流的下

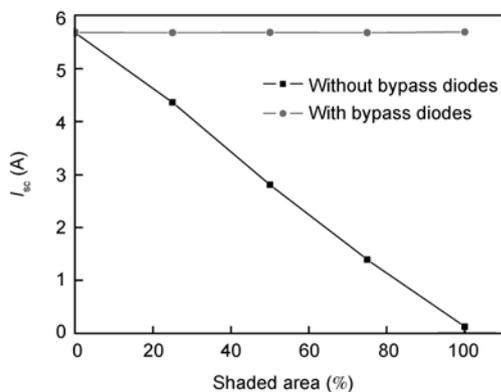


图 11 组件  $I_{sc}$  随遮挡比例增大的变化曲线

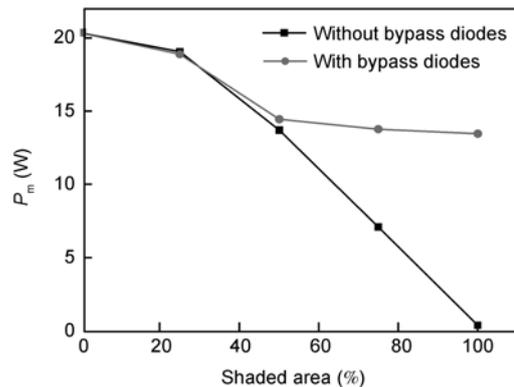


图 12 组件  $P_m$  随遮挡比例增大的变化曲线

降而发生较大损失, 见图 12.

以上实验结果表明, 旁路二极管使组件的短路电流保持稳定, 并且可以有效地减少组件在遮挡时的功率损失.

#### 4 结论

本实验成功地在太阳能电池片上制作了旁路二极管, 该旁路二极管的单向导电性能显著, 当组件中的单片太阳能电池发生遮挡时, 能起到旁路作用, 改善组件  $I-V$  特性曲线, 使组件的短路电流保持稳定, 并且可以有效地降低遮挡时组件输出功率的损失.

#### 参考文献

- Swaleh M S, Green M A. Effect of shunt resistance and bypass diodes on the shadow tolerance of solar cell modules. *Solar Cells*, 1982, 5: 183-198
- Silvestre S, Chouder A. Effects of shadowing on photovoltaic module performance. *Prog Photovolt: Res Appl*, 2008, 16: 141-149
- Silvestre S, Boronata A, Chouder A. Study of bypass diodes configuration on PV modules. *Appl Energy*, 2009, 86: 1632-1640
- Dally R B, Kululka J R, Schwartz J A. The design, qualification and use of bypass diode integration onto GaAs/Ge solar cells. In: *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty Fifth IEEE, Washington, DC, USA, 1996*. 333-335
- Chiang P K, Chu C L, Yeh Y C M, et al. Progress toward high-efficiency (>24%) and low-cost multi-junction solar cell production. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 2001, 66: 615-620
- Green M A, Gauja E, Withayachamnankul W. Silicon solar cells with integral bypass diodes. *Solar Cells*, 1981, 3: 233-244
- Green M A, Suryanto H E, Wenham S R. Thermal performance of integral bypass diode solar cell modules. *Solar Cells*, 1986, 19: 97-108
- Suryanto H E, Wenham S R, Green M A. Shadow tolerance of modules incorporating integral bypass diode solar cells. *Solar Cells*, 1986, 19: 109-122