What is the ultimate efficiency of photovoltaic cells?

太阳能电池效率分析

魏世源, 孙伟海, 陈志坚, 肖立新*

北京大学物理学院, 人工微结构和介观物理国家重点实验室, 北京 100871

* 联系人, E-mail: lxxiao@pku.edu.cn

2016-03-14 收稿, 2016-03-16 修回, 2016-03-16 接受, 2016-04-14 网络版发表

国家自然科学基金(61575005, 11574009)资助

摘要 在化石能源日益枯竭的背景下, 可再生能源特别是太阳能的利用越来越显示其重要性, 由此太阳能的开发利用方式越来越多, 能量转换效率不断攀升, 使用成本不断下降. 其中利用太阳能的主要方式为太阳能电池, 目前大致可分为三大类: 晶体硅太阳能电池、薄膜太阳能电池和新型太阳能电池. 晶体硅太阳能电池又分为单晶硅及多晶硅太阳能电池. 薄膜太阳能电池包含非晶硅太阳能电池和多元化合物太阳能电池. 而新型太阳能电池包括有机太阳能电池、染料敏化太阳能电池、量子点太阳能电池和杂化钙钛矿太阳能电池等. 本文从分析太阳能电池的理论效率出发, 与目前太阳能电池的实验效率结合, 通过对比各类电池实验效率与理论效率, 展望其未来发展前景.

关键词 太阳能电池, 晶体硅太阳能电池, 薄膜太阳能电池, 新型太阳能电池, 理论极限效率, 实验效率

1 太阳能电池工作原理简述

当太阳光照射在半导体时, 能量大于半导体禁带宽度的光子会在半导体内激发出电子-空穴对. 在电子-空穴对复合之前, 若其能穿越耗尽层, 便可以在结电压作用下分离, 使原内建电场势垒降低, 电子向n区移动而空穴向p区移动而产生光生电流. 分离后的电子和空穴使得p区带正电而n区带负电, 于是在n区和p区之间会产生电势差, 这便是光生伏特效应, 如图1所示.

开路电压(V_{oc})就是在外电路为开路状态时p-n结两端的电势差, 也就是光生电压的最大值. 而短路电流(J_{sc})为外电路短路时流过p-n结两端的电流值.

2 太阳能电池能量转换效率的理论分析

太阳能电池的能量转换效率定义为电池接外电路时吸收的光功率转化为最大输出电功率的百分比, 在标准测试环境下(室温25℃, 太阳能辐照度1000

W/m², 大气质量AM_{1.5}), 太阳能转化效率 η 是用太阳能电池的最大输出功率 $P_m = I_m \times V_m$ 除以太阳光辐照功率 P_s , 即 $\eta = I_m \times V_m / P_s$. 定义填充因子 FF 后, 可用填充因子改写为 $\eta = J_{sc} \times V_{oc} \times FF / P_s$, 其中 J_{sc} 为短路电流, V_{oc} 为开路电压. 由于短路电流随半导体禁带宽度(E_g)增加而减小, 开路电压随半导体禁带宽度增加而增大, 例如有机太阳能电池的开路电压经验公式为 $V_{oc} = \frac{1}{q}(|HOMO - LUMO|) - 0.3V$ ^[1]. 由此可知一定存在一个最佳的半导体禁带宽度使效率达到最高.

目前, 单p-n结太阳能电池的理论效率有两种计算方法. 一种是利用经验公式进行计算. 对于理想单p-n结电池, 开路电压 $V_{oc} = \frac{kT}{q} \times \ln(1 + I_L / I_0)$, 其中 I_L 为光生电流, I_0 为二极管的饱和电流, 用经验公式可以表示为 $I_0 = 1.5 \times 10^5 \exp^{-E_g / kT}$. 而 J_{sc} 最大值可直接通过光子能量分布的积分得出(积分从短波长到给定

引用格式: 魏世源, 孙伟海, 陈志坚, 等. 太阳能电池效率分析. 科学通报, 2016, 61: 1748-1753

Wei S Y, Sun W H, Chen Z J, et al. The analysis of the efficiency of solar cells (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1748-1753, doi: 10.1360/N972016-00345

图1 (网络版彩色)太阳能电池工作原理简图

Figure 1 (Color online) The working principle diagram of solar cell

半导体的吸收带边波长). 利用上述计算方法, 在禁带宽度为1.4~1.6 eV之间, 将得到最高效率, 约为29%^[2]. 例如禁带宽度为1.1 eV的Si电池, 极限效率为27.8%, 而禁带宽度为1.4 eV的GaAs电池, 极限效率为29.7%. 实际使用中, J_{sc} , V_{oc} , FF 均有损失, 短路电流会因表面反射而损失, 而半导体中的复合过程会直接导致三者均出现损失, 因此实际效率都会低于理论值.

另一种更为主流的方式是利用细致平衡原理进行计算^[3]. 这一原理可以计算电子-空穴对复合过程仅为辐射复合的情形或者辐射复合过程在全部复合过程占一个固定比例 f_c 的情形. 该方法广泛用于处理黑体太阳能电池理论效率的计算. Shockley等人^[3]假设太阳为温度6000 K的黑体, 测试器件(即太阳能电池)为温度300 K的黑体以满足黑体辐射Stefan-Boltzmann定律的使用条件. 据此可知, 当禁带宽度为1.1 eV, $f_c=1$ 即辐射复合过程为全部复合过程时, 效率最大, 此时的极限效率为30%(AM₀), 在AM_{1.5}情形下为34%.

除了传统的p-n结电池外, 还有由金属与裸露的半导体表面相接触而形成的肖特基结太阳能电池. 肖特基结多出现于有机太阳能电池, 由有机化合物与金属电极构成. 与p-n结电池的结电流由少数载流子扩散运动决定不同, 肖特基结中的电流由多数载流子通过热电子发射跃过内建电势差而形成. 该电流的热电子发射分量 $J_{oe} = A \times T^2 \times \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \times (e^{qV/kT} - 1)$ ^[4], 其中A为有效理查德常数, ϕ_B 为界面势垒高度. 从光伏能量转换角度来看, 这个额外的电流分量是不希望出现的, 它将增加二极管暗饱和电流, 从而减小开路电压. 因此势垒越大, 器件性能越

好. 由于大部分的有机半导体材料激子扩散距离比较短, 器件内串联电阻较高而使得填充因子较低, 所以综合以上因素, 肖特基结的电池效率一般都很低. 目前, 有机太阳能电池通过增加缓冲层, 添加电子传输层和空穴传输层来抑制肖特基结的出现, 使得有机太阳能电池的效率大幅提高.

多结太阳能电池能够提高效率, 如双结、三结、三十六结太阳能电池在聚光条件下的理论效率分别为50%, 56%和72%^[5]. 聚光可以提高电池效率, 因为将光聚集在太阳能电池上可以增加电子-空穴对的密度, 从而提高光的利用率.

3 太阳能电池的分类及其实验效率

3.1 晶体硅太阳能电池

(i) 单晶硅太阳能电池. 单晶硅太阳能电池非常普及, 广泛应用于发电厂, 道路照明系统, 充电系统及分体式太阳能电源等, 其光电转换效率高, 稳定性好, 使用年限长. 目前单晶硅太阳能电池最高效率为25%. 单晶硅电池禁带宽度1.1 eV, 理论上所得到的最大开路电压约为0.7 V, 相应的最高填充因子为0.84.

(ii) 多晶硅太阳能电池. 多晶硅太阳能电池应用最为广泛, 制作工艺与单晶硅太阳能电池相类似. 虽然其成本低于单晶硅电池, 但是其效率比单晶硅太阳能电池相差较大, 目前最高达到21.3%.

但对于单结太阳能电池来说, 其理论效率约为30%, 目前单晶硅太阳能电池已达到25%, 进一步提高器件效率有一定难度, 而多晶硅太阳能电池仍有进一步的提升空间.

3.2 薄膜太阳能电池

(i) 非晶硅太阳能电池. 在晶体硅太阳能电池之后, 约在19世纪80年代开始出现非晶硅薄膜太阳能电池产品, 由于非晶硅太阳能电池的制作方法晶体硅太阳能电池完全不同, 制作工艺简化, 材料使用量减少, 因此其成本下降较多, 但是目前存在的主要问题是光电转化效率很低, 最高效率约为13%, 且稳定性较差, 效率随着使用时间逐渐降低.

(ii) 化合物太阳能电池. 化合物太阳能电池种类繁多, 但尚未大批量生产, 目前此类电池的研究主要集中在II-VI族化合物如CdTe, I-III-VI族化合物

如CuInSe₂(CIS)及CuInSe₂掺Ga元素(CIGS)以及III-V族化合物如GaAs, InP和多结太阳能电池等. 以下为化合物太阳能电池实验效率及未来发展状况.

(1) CdTe太阳能电池. 目前太阳能电池的发展方向是追求低成本、高效率和高稳定性, 因此CdTe电池备受关注, CdTe禁带宽度约为1.45 eV, 具有较为理想的吸收光子的能力, 理论上光电转换效率可达28%, 目前得到的最高的转换效率约为21%. 但是由于电池中含有有毒元素Cd, 对环境不利, 因此其未来的发展会在一定程度上受到限制.

(2) CIS/CIGS 太阳能电池. 自20世纪80年代, I-III-VI族化合物如铜铟硒太阳能电池开始发展. 由于CIS的禁带宽度仅为1.0 eV, 因此用CIS制成的太阳能电池效率较低. 若CIS中掺入Ga元素, 可使CIS的禁带宽度增大, 在1.02~1.68 eV范围内调整, 因此增大了开路电压, 提高了电池的效率. CIGS理论效率约为29%(禁带宽度在1.48 eV左右时达到), 目前CIGS太阳能电池的最高效率已达22%, 还有较大的发展空间, 但是In属于稀有元素, 储量有限.

(3) 单结砷化镓太阳能电池. 砷化镓可以用于高倍聚光电池, 能带隙为1.42 eV, 适合做单结太阳能电池, 其理论效率值可达30%, 目前单结薄膜砷化镓和单结单晶砷化镓效率分别达到了28.8%和26.4%. 砷化镓电池耐高温性好, 稳定性高, 不过砷化镓太阳能电池的成本高, 砷化镓电池的成本大概为单晶Si电池的5~10倍.

(4) 磷化铟太阳能电池. 磷化铟的能带间隙为1.35 eV, 适合做单结太阳能电池, 理论效率约为29%, 目前已达到效率只有约20%. 虽然磷化铟电池的成本较为昂贵, 但是它抗辐射能力是所有太阳能电池中最强的, 因此目前磷化铟电池主要应用在卫星等航天工具上.

(5) 多结太阳能电池. 太阳能电池的能量转换效率受到能隙的限制, 如果考虑将太阳光按波段分开, 同时用与相应波段能量相匹配的电池来转换光能, 效率必定会提高. 在制作多结太阳能电池的时候, 每一结处能隙的选择便显得至关重要. 双结太阳能电池方面, 根据Wanlass的计算结果, 上下电池的能隙分别位于1.65和0.90 eV附近时效率最高^[6], 目前效率较高的是GaAs/GaSb的双结太阳能电池, 其效率超过了30%, 这两个材料的能隙分别为1.42和0.72 eV. 三结太阳能电池方面, 以GaInP/GaAs/Ge结构为主. 而四

结太阳能电池以GaInP/GaAs/InGaAs/Ge结构为主, 效率都在40%左右.

3.3 新型太阳能电池

(i) 有机太阳能电池. 有机太阳能电池是以具有光敏性质的有机材料作为半导体的新型太阳能电池, 第一个有机光电转化器件于1958年, 由Kearns和Calvin两人制备而成^[7], 但是光电转换效率非常低而且开路电压也只有200 mV. 与无机太阳能电池不同, 有机半导体材料的激子扩散长度只有10~20 nm, 远小于吸光层厚度, 从而载流子无法有效传输, 使得有机太阳能电池的效率偏低. 即便有机材料的选择多种多样(这也是有机太阳能电池的巨大优点之一), 器件的效率始终无法达到实用化的程度. 尽管这方面的研究发展迅速, 新的报道层出不穷, 目前有机材料器件的最高效率为11.5%, 还有很大的发展空间.

(ii) 染料敏化太阳能电池. 在1990年以前, 染料敏化电池就已经出现, 虽然其成本很低(约为硅电池的1/10), 但是光电转换效率特别低, 因此并没有被重视. 直到1991年Gratzel教授采用纳米多孔TiO₂使其效率达到了7%^[8], 自此开启染料敏化太阳能电池的研究热潮. 染料敏化电池的材料种类繁多, 早期所使用的材质均以液态电解质为主, 近期在固态和胶态电解质也有所发展. 目前染料敏化电池验证效率达到了11.4%, 染料敏化电池制作简单, 成本低, 但是其稳定性及效率问题并不理想, 因此始终无法投入大规模生产.

(iii) 量子点太阳能电池. 量子点是指其能级由其尺寸直接决定, 具有量子效应的纳米晶粒. 因此, 与传统太阳能电池相比较而言, 其优势在于可以通过调整量子点的形状与尺寸来优化量子点的能级, 从而更好地匹配太阳光谱, 提高电池效率^[9]. 同时用作量子点的材料也是多种多样, 如CdSe, CdS, PbS, PbTe等, 更是增加量子点能级的可变性. 此外, 量子点除了能级的可变性以外, 还会出现多重激子效应, 即半导体材料吸收一个光子可产生多个电子-空穴对^[10], 与传统太阳能电池中吸收一个光子只产生一个电子-空穴对相比, 量子点太阳能电池的这一性质有望极大提升电池效率. 目前, 量子点太阳能电池还有许多问题需要克服, 如对量子点尺寸的调控, 排列方式, 排列密度以及电池中电子-空穴对复合的问题等. 近期量子点太阳能电池的发展取得突破, 效率已

经达到10.6%，随着研究的深入，制作手法的不断完善，量子点太阳能电池的性能一定会突飞猛进。

(iv) 钙钛矿太阳能电池。在众多的新型太阳能电池中，钙钛矿太阳能电池近年来脱颖而出，吸引了众多科研工作者的关注。最初属于染料敏化电池的衍生物而被使用于液态电池，但是效率很低只有不到4%，然而采用固态电池后，其效率直线上升。2012年超过了10%，随后在2013年，关于钙钛矿电池的报道数量急剧增加，发展非常迅速，效率也是节节攀升，给人以无尽的展望空间。目前制备钙钛矿太阳能电池的方法各异，这也暗示着其性能还远远未达到最优，2015年，*Science*发表的器件效率达到了20.1%^[11]，而在很短时间内其效率又提升到了21%。在钙钛矿材料的选择上具有很大的灵活性，可以通过选择不同的材料来改变禁带宽度，目前比较常用材料的是 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 为1.5 eV^[12]，其短路电流 J_{sc} 最大理论值为24 mA/cm²。目前实验所得的短路电流最大能达到20 mA/cm²左右，短路电流损耗约17%，这也使得目前钙钛矿太阳能电池效率与其理论效率28%还相差甚远。 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 不仅其吸光能力很强，其电荷传输性能也很好，缺陷是所含的铅元素是重金属元素，污染环境，目前有大量的实验在尝试新的

元素来替换铅元素，但效果还不够理想。器件效率的高低很大程度上取决于钙钛矿这一层膜的均匀性与形貌。最近大面积(1 cm²)器件的效率已经达到15%^[13]，器件的稳定性也有突破^[14]，钙钛矿电池的未来充满期待。

各类太阳能电池的理论与实验效率及性能比较总结于表1。

4 结论和展望

晶体硅太阳能电池以其较高的效率和良好的稳定性占据着大部分光伏市场，单晶硅电池的效率稳定性好，但成本较高，多晶硅电池的成本较低但效率也稍低，目前一类热门的异质结本征薄膜(HIT)太阳能电池将晶体硅与非晶硅同时应用在了这一电池结构中。禁带宽度不同的晶体硅和非晶硅薄膜构成的异质结增大了开路电压和短路电流，从而提升了电池效率。这一类电池效率已经达到了25.6%，随着工艺不断完善，其效率一定还会继续提升。

化合物太阳能电池除少数昂贵的电池外均大大降低了太阳能电池的成本，效率也比较高，而其可制成薄膜形态的这一优点更是巨大的突破。不过其中有些电池包含对环境有害的元素，以及稳定性差等

表1 各类太阳能电池实验效率及性能比较(数据来源于NREL)

Table 1 Experimental efficiencies and properties of solar cells (the data are taken from NREL)

电池种类	非聚光下最高效率(%)	聚光下最高效率(%)	优点	缺点
单晶硅	25.0	27.6	效率高，使用年限长	成本较高
多晶硅	21.3	—	成本较低，制作简单	效率不够高
非晶硅	13.6	—	价格便宜，生产速度快	效率较低，稳定性差
CdTe	21.5	—	工艺简单易于大规模生产，成本低	Cd是有毒的元素，而且Cd的天然储备量有限
CIGS	22.3	23.3	成本低，稳定性较好，抗辐射能力较强	In和Se是稀有元素，材料储量有限
单结单晶砷化镓	27.5	29.1	光电转换效率高，抗辐射能力强	生产设备复杂，生产周期长，成本高
单结薄膜砷化镓	28.8	—	同上	同上
磷化铟	22.6	—	抗辐射能力最强，稳定性好	成本太高，材料来源有限
双结太阳能电池	31.6	34.1	—	—
三结太阳能电池	37.9	44.4	—	—
四结太阳能电池	38.8	46.0	—	—
有机太阳能电池	11.5	—	成本低廉，原料广泛	光电转换效率低
染料敏化太阳能电池	11.9	—	易于大规模生产，成本低	光电转换效率低，稳定性差
量子点太阳能电池	10.6	—	可拓宽光谱吸收，稳定性较好	光电转换效率低
钙钛矿太阳能电池	21.0	—	成本非常低，效率较高，工艺简单	铅是有毒元素，电池的稳定性比较差

因素,使得化合物电池无法进行大规模量产使用.未来随着效率继续攀升,加上其薄膜形态的优势,化合物电池将会得到更多的使用.

新型太阳能电池如有机太阳能电池、染料敏化太阳能电池和量子点太阳能电池都存在着一个共同缺陷:即效率较低,如何提高效率是这些太阳能电池面临的最迫切问题.除此之外,近年来兴起的钙钛矿太阳能电池如果在非铅材料和电池的稳定性方面取得

突破之后,很有可能改变目前光伏市场的局势,在激烈的竞争中占据一席之地.

在效率方面,单结太阳能电池的效率极限只有 30%,想要突破这一理论效率,只有依靠多结太阳能电池.未来,多结太阳能电池将会拥有很大发展空间,其中各子电池的选择有很多.多结太阳能电池还远远未达到发展的顶峰,其效率有望超过 50%,成本还可以继续降低,性能的继续突破指日可待.

参考文献

- 1 Veldman D, Meskers S, Janssen R, et al. The energy of charge-transfer states in electron donor-acceptor blends: Insight into the energy losses in organic solar cells. *Adv Funct Mater*, 2009, 19: 1939–1948
- 2 Green M A. *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1981
- 3 Shockley W, Hans J Q. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *J Appl Phys*, 1961, 32: 510–519
- 4 Sze S M, Ng K K. *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd ed. New York: Wiley, 2006
- 5 Henry C H. Limiting efficiency of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells. *J Appl Phys*, 1980, 51: 4494–4500
- 6 Lary D P. *Solar Cells and Their Applications*. New York: John Wiley & Sons, 1995
- 7 Kearns D, Calvin M. Photovoltaic effect and photoconductivity in laminated organic system. *J Chem Phys*, 1958, 29: 950–951
- 8 Oregan B, Gratzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films. *Nature*, 1991, 353: 737–740
- 9 Zhao J, Zeng Y P. Advances in novel high-efficiency solar cell research (in Chinese). *Physics*, 2011, 40: 233–240 [赵杰, 曾一平. 新型高效太阳能电池研究进展. *物理*, 2011, 40: 233–240]
- 10 Beard M C. Multiple exciton generation in semiconductor quantum dots. *J Phys Chem Lett*, 2011, 2: 1282–1288
- 11 Yang W S, Noh J H, Jeon N J, et al. High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. *Science*, 2015, 348: 1234–1237
- 12 Ma Y Z, Wang S F, Zheng L L, et al. Recent research developments of perovskite solar cell. *Chin J Chem*, 2014, 32: 957–963
- 13 Chen W, Wu Y Z, Yue Y F, et al. Efficient and stable large-area perovskite solar cells with inorganic charge extraction layers. *Science*, 2015, 350: 944–948
- 14 Service R F. Cesium fortifies next-generation solar cells: A dash of the metal could hold the key to making cheap, durable perovskite photovoltaics. *Science*, 2016, 351: 113–114

肖立新

北京大学物理学院教授, 博士生导师. 2000 年博士毕业于日本东京大学. 英国皇家化学学会 Fellow, 美国材料学会及中国光学学会会员. 2006 年回国, 在北京大学物理学院从事有机发光材料、新一代薄膜太阳能材料及其器件物理方面的研究. 主持国家自然科学基金项目, 作为课题组长承担过国家重点基础研究发展计划(973 项目), 2006 年以来发表 SCI 学术论文 90 余篇及申请中国发明专利 20 余件, 获得 2015 年度教育部自然科学一等奖(排名第一).

The analysis of the efficiency of solar cells

WEI ShiYuan, SUN WeiHai, CHEN ZhiJian & XIAO LiXin

State Key Laboratory for Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

Under the circumstances of the increasing depletion of fossil fuels, renewable energy, especially solar energy, is becoming more and more important. Thus, the methods of exploring solar energy are diverse and the energy conversion efficiency keeps rising while the cost keeps decreasing. Among all the methods, using solar cell is the main way to explore solar energy. Currently, solar cells can be divided into three main categories, crystalline silicon solar cells, thin film solar cells and novel solar cells. Crystalline silicon solar cells can also be divided into monocrystalline silicon solar cell and polycrystalline silicon solar cell. These two kinds of solar cells are the most common solar cells in our daily life. The efficiency of monocrystalline silicon solar cell is already pretty high reaching 25% while polycrystalline silicon solar cell reaches 21.3%. The stability of monocrystalline silicon solar is also better than that of polycrystalline silicon solar cell. The only fly in the ointment is that the cost of monocrystalline silicon solar is a little bit higher than polycrystalline silicon solar cell which makes monocrystalline silicon solar not optimal enough. Thin film solar cell includes amorphous silicon solar cells and multi-compounds solar cells. The transformation of solar cells from solid panel to thin film is one of the most significant breakthroughs of the second generation solar cell. The amorphous silicon solar cell becomes much cheaper than both monocrystalline silicon and polycrystalline silicon solar cells. But its drawback is obvious, its efficiency only reaches 13.6% which certainly needs to be improved. As for semiconductor compounds solar cells, there are made by various semiconductor materials. Major semiconductor compound solar cells contain chemical materials such as CdTe, CuInSe₂(CIS), CuInSe₂ doped Ga(CIGS), GaAs, InP, and multi-junction solar cell, etc. Materials like CdTe and CIGS can surely lower the cost of solar cells and their efficiencies are pretty high reaching 21.5% and 22.3%, respectively. But Cd is a toxic element while In and Se are rare elements, their reserves are limited. Materials like GaAs and InP are much more expensive comparing to others, but their efficiencies are pretty satisfying reaching 28.8% and 22.6%, respectively. More importantly, they have rather high radiation tolerance, especially InP solar cell has the best radiation tolerance among all kinds of solar cells. Thus, despite their high costs, they can still be used in many situations such as space station. As for multi-junction solar cell, the most prominent feature of it is the high efficiency. Solar cells with two junctions, three junctions and four junctions have reached the efficiencies of 31.6%, 37.9% and 38.8%. Obviously, multi-junction solar cells are the best choice to improve energy conversion efficiency. The novel solar cell consists of organic solar cells, dye-sensitized solar cells, quantum dot solar cells and hybrid perovskite solar cells. Among all these third generation solar cells, perovskite solar cell is the most promising one due to its superior properties and rapid improvement. Its efficiency has already reached 21% in only a few years. But more work needs to be done to improve its properties such as its stability and currently perovskite solar cell still contains lead which is toxic and may need to be replaced. This paper starts from analyzing the theoretical efficiency of solar cells, then compares those theoretical efficiencies with experimental efficiencies to present the expectation of different kinds of solar cells.

solar cell, crystalline silicon solar cell, thin film solar cell, novel solar cell, theoretical limiting efficiency, experimental efficiency

doi: 10.1360/N972016-00345