

What is the ultimate efficiency of photovoltaic cells?

太阳能电池的最终效率探讨

钱志成^{①②}, 戴晓^②, 史鹏^{①*}, 尹万健^②, 姜艳辉^②, 邹贵付^{②*}^① 西安交通大学电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 西安 710049;^② 苏州大学物理光电能源学部和苏州纳米科技协同创新中心, 苏州 215006

* 联系人, E-mail: spxjy@mail.xjtu.edu.cn; zouguifu@suda.edu.cn

2015-11-27 收稿, 2016-01-08 修回, 2016-01-22 接受, 2016-03-04 网络版发表

摘要 太阳能电池利用光伏效应将太阳能直接转换为电能, 拥有可再生、清洁、安全、寿命长等优点, 被认为是最有前途的可再生能源技术之一. 虽然光电转化效率在10%~18%的太阳能电池已经实现大规模产业化应用, 但如何进一步提升太阳能电池的光电转换效率依然是研究者面临的最重要的挑战. 近年来, 随着新材料和新技术的不断发展, 单结太阳能电池的效率越来越逼近S-Q效率极限; 另一方面, 随着多结太阳能电池、中间带太阳能电池等新概念太阳能电池的出现, 太阳能电池效率纪录在不断地被改写. 本文围绕太阳能电池的效率极限, 主要讨论了各类单结太阳能电池、多结太阳能电池的基本原理和优缺点, 分析了限制它们效率进一步提升的主要因素, 并展望了新概念太阳能电池的发展与效率极限.

关键词 太阳能电池, 转换效率, 带隙

传统太阳能电池最多可以将32%的太阳能转化为电能. 研究人员可以突破这个效率极限吗? 太阳能电池最终可以达到多高的转换效率? 该问题是2005年Science提出的125个科学前沿问题之一.

化石能源是当今人类社会从事生产活动消耗的最主要能源形式. 然而随着世界经济的发展, 能源的需求量逐年增加, 化石能源过度消耗并且伴随着地球环境的日益恶化, 发展清洁、可再生的新能源成为社会长期可持续发展的迫切需要. 其中, 太阳能电池因其具有清洁、取之不尽的特点, 受到人们最多的关注和期待. 尤其是近几年发展迅猛的有机-无机杂化钙钛矿太阳能电池, 凭借其优异的性能, 不断刷新效率纪录, 成为世界范围的研究热点, 并被评为2013年全球十大科学突破之一. 世界范围内新一轮的能源热再度升温, 太阳能电池的最终效率如何, 值得我们深思.

1 Shockley-Queisser转换效率极限

典型的太阳能电池转换效率极限, 也就是所谓的S-Q效率极限(Shockley-Queisser limit), 是Shockley和Queisser^[1]计算出的单结电池的最大热力学效率(图1), 一直是太阳能电池效率的理论瓶颈. Shockley和Queisser^[1]分析, 光电转换过程中能量损耗的原因主要有3个: (1) 光子能量低于半导体材料的带隙能量时, 光子不会被吸收, 换言之, 这部分光子对电池输出电能没有任何贡献的同时, 能量大于带隙的光子, 其超过带隙能量的那部分能量以热量的形式损失^[2]; (2) 黑体背景辐射. 量子力学告诉我们任何绝对温度不为零的物体都会不可避免地向外辐射电磁波. 计算结果表明, 室温(300 K)下黑体辐射损失的能量约占太阳能的7%; (3) 电子-空穴的辐射复合. 根据细致平衡原理(detailed balance), 电子和空穴在吸收层中相遇时不可避免地会产生辐射复合, 重新

引用格式: 钱志成, 戴晓, 史鹏, 等. 太阳能电池的最终效率探讨. 科学通报, 2016, 61: 964-970

Qian Z C, Dai X, Shi P, et al. Discussion about ultimate efficiency of solar cells (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 964-970, doi: 10.1360/N972015-01328

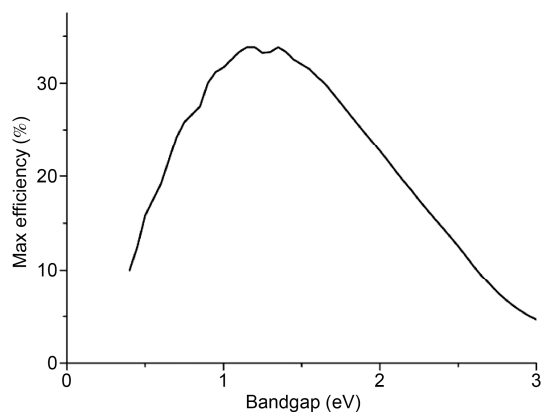


图1 太阳能电池的S-Q转化效率极限^[1]
Figure 1 The S-Q limit for conversion efficiency of the solar cells^[1]

产生光子辐射出去. 综合考虑以上因素, 太阳能电池的效率(η)可以用式(1)描述^[3]:

$$\eta = \frac{qV(\Phi_s - \Phi_r)}{\sigma T_{\text{sun}}^4}, \quad (1)$$

其中, q 是电子电荷, V 是器件电压, Φ_s 和 Φ_r 分别是入射太阳光和辐射复合的光子流强度, σ 是Stefan-Boltzmann常数, T_{sun} 是太阳的温度. 根据式(1), 单节太阳能电池在非聚光条件下的效率峰值是33.7%. 同时, 当入射光强度 Φ_s 变大时(聚光条件下), 效率将增大; 另一方面, 入射强度变大, 会使太阳能电池温度升高, 同时载流子浓度上升, 增加电子空穴的复合辐射概率, 从而使 Φ_r 增大. 因此, 单节聚光太阳能电池也有一定的效率极限.

以上分析是在理想情况下得出的结论, 其实还存在着电池有限厚度活性层对光的不完全吸收、前表面(front face)玻璃的反射, 以及非辐射复合、等效串联电阻、并联电阻等因素的影响. 实际单结太阳能电池逼近上述效率极限比较困难. 如何突破S-Q效率极限, 大幅度地提高对太阳光的利用率是太阳能电池

研究和产业界最关注的问题.

2 标准太阳能电池的效率极限

这里所谓的标准太阳能电池主要指单结器件, 按照活性层所使用的材料不同, 太阳能电池主要分为硅基太阳能电池、化合物太阳能电池、有机太阳能电池、以及近几年发展起来的以钙钛矿为代表的有机-无机杂化太阳能电池. 由于篇幅有限, 这里(表1)简单列举部分最高转换效率标准太阳能电池情况.

2.1 硅基太阳能电池

硅基太阳能电池分为晶体硅和非晶硅太阳能电池, 前者又被称为传统太阳能电池, 在太阳能市场占主体地位. 单晶硅是应用于太阳能电池的最早的半导体材料. 单晶硅的带隙约1.12 eV, 其非平衡载流子寿命较长, 电池稳定性较好^[10,11]. 目前单晶硅电池的转换效率已可以达到25%左右^[7], 但是单晶硅的生产成本较高, 而且单纯从电池结构优化上进一步提高转换效率的可行性并不高, 转换效率的提高受到限制. 多晶硅的原子基本排列形式与单晶硅相同但排列晶面不同, 因此多晶硅各向异性不明显, 晶体缺陷相对较多, 电阻率较大, 转换效率也较低, 目前最高转换效率在15%左右.

研究者提出了一些成熟的方法来提高硅基太阳能电池的转化效率, 如通过单晶硅表面微结构处理和分区掺杂, 将表面制成倒金字塔结构, 或者在表面涂一层减反射层来提高光吸收. 此外, 晶体硅的带隙为1.12 eV, 只能够吸收波长短于1100 nm的近红外光. 为了拓展对更长波长范围的光吸收, 可以利用上转换材料把亚带隙(sub-band-gap)近红外光(波长大于1100 nm)转换为可见光/近红外光(波长小于1100 nm). 例如, 把铈掺杂氟化钇钠上转换材料沉积在硅基太阳

表1 标准空气质量地面谱AM1.5条件下, 最高效率标准太阳能电池的参数^{a)}

Table 1 The parameters of standard solar cells with maximum conversion efficiency under the standard air-mass AM1.5 terrestrial spectrum

太阳能电池	开路电压(V)	短路电流(mA/cm ²)	填充因子(%)	转换效率(%)	文献
单晶硅	0.696	42.0	83.6	24.4	[4]
多晶硅	0.662	39.0	80.2	20.8	[5]
HIT	0.740	41.8	82.7	25.6	[6]
GaAs	1.122	29.6	86.5	28.8	[7]
钙钛矿	1.130	22.7	75.0	19.3	[8]
CIGS	0.746	36.6	79.3	21.7	[9]

a) HIT, 带本征层异质结; CIGS, 铜钢镓硒

能电池的背面,可以有效提高器件对近红外光谱的响应^[12]. Trupke等人^[13]计算了标准空气质量地面谱条件(AM1.5)下,单结电池结合理想的上转换材料后,光电转化效率上限可以达到50.7%.

基于晶体硅太阳能电池发展起来的HIT太阳能电池,其结构是在晶体硅一侧沉积1层本征非晶硅(a-si)膜和1层P型a-si膜,另一侧沉积1层本征a-si膜和1层N型a-si膜,形成对称结构,使晶体硅和非晶硅组成异质结.该结构在p-n结成结的同时完成了晶体硅的表面钝化,大大降低了表面、界面漏电流,可以提高电池效率.2014年,Panasonic公司公布了目前实验室得到的最高能量转换效率25.6%^[16].

2.2 化合物太阳能电池

化合物太阳能电池主要包括CdTe, GaAs, CIGS等化合物材料组成的太阳能电池,在大规模太阳能发电、太阳能建筑一体化及小规模独立发电系统中具有重要作用.与硅基太阳能电池相比,通常化合物太阳能电池的转换效率更高、更耐高温、更耐辐照.例如, GaAs是III-V族半导体材料的典型代表,其带隙为1.43 eV,正好位于理想电池的带隙范围内,并且具有高的吸收系数.理论上,单结GaAs太阳能电池的转换效率远高于硅基太阳能电池,是非常理想的太阳能材料.由于GaAs材料的优异性能,自从被发现后的几十年间, GaAs太阳能电池在实验和理论方面的研究发展十分迅速,经历了从液相外延技术到金属有机化学气相沉积技术,从单结到多结的发展过程,同时效率也随之不断提高.目前单结GaAs太阳能电池的最高转换效率已经接近28.8%^[7],而多结GaAs太阳能电池的转换效率可达到38%以上,是目前光电转换效率最高的太阳能电池^[14,15].

再比如受到广泛关注的CIGS太阳能电池,它是由Cu, In, Ga, Se 4种元素构成的黄铜矿结晶薄膜太阳能电池,具有稳定性好、抗辐照性能好、成本低、效率高等优点.经美国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory)测试及认证,目前CIGS太阳能电池光电转换效率最高达到了21.7%.若利用聚光装置的辅助,效率可以进一步大幅度提高.

2.3 有机-无机杂化钙钛矿太阳能电池

近年来有机-无机杂化钙钛矿太阳能电池因为具有光吸收强、载流子迁移率高、易加工等优点而引起

研究者的关注^[16~20].尤其近几年其光电转换效率不断刷新,从2009年的3.8%到目前为止报道的超过20%,发展十分迅速,可以预计其转换效率在不久后将进一步提高,具有非常广阔的发展前景.对于钙钛矿太阳能电池,可以通过以下途径来提高光电转化效率.

通过调节钙钛矿材料的组分来调节带隙,从而调节吸收范围;通过界面调控来提高电子和空穴的抽出;钙钛矿薄膜的形貌与结晶度直接影响载流子的产生与迁移,因此,优化钙钛矿成膜过程至关重要,比如,通过选择合适溶剂、退火条件及不同的薄膜沉积技术来优化成膜过程.和其他单结电池一样,钙钛矿电池也存在着正面(front face)玻璃基底对入射光的反射,可以通过减反射手段(anti-reflective strategy)来减少这种损失.例如,沉积1/4波长的减反射涂层,或者将玻璃基底做成纹理结构(texturing).理论预测,利用朗伯光诱捕,带隙为1.55 eV的单结钙钛矿太阳能电池的效率上限为31%.为了突破上述效率极限,可以拓宽电池对于入射光的吸收范围.钙钛矿材料的光谱吸收范围为300~800 nm,结合晶体硅(300~1200 nm)制备成叠层结构,吸收范围可拓展至红外区域.理论计算显示,对于双结钙钛矿/单晶硅堆积结构的太阳能电池,其光电转换效率的上限为40.6%^[21].

3 高转换效率太阳能电池

为了进一步降低成本,提高光电转换效率,寻找新的材料、改善器件结构、降低能量损耗都是行之有效的方法.基于此,近年来许多新型电池概念被提出,研究人员通过大量的工作使这些太阳能电池的效率有可能突破S-Q效率极限.

3.1 多结太阳能电池

单一半导体材料组成的太阳能电池,如硅基太阳能电池、GaAs太阳能电池等,只能吸收光谱中的一部分光能并将其转换为电能,转换效率受到单一带隙极限转换效率的限制,无法超越S-Q效率极限.因此,采用多结(multi-junction)结构(表2),以多种带隙不同的半导体材料构成叠层电池从而最大化利用光能,成为突破光电转换效率限制的途径之一.

多结太阳能电池一般是将2个或多个带隙不同的子电池按带隙从宽到窄、由上至下依次排列.光入射

时首先进入顶部带隙最宽的子电池, 高能量的光子在此被吸收, 而未被吸收的光则逐级向下进入下层各级带隙较窄的子电池并依次被吸收, 这样光能就可以得到最大程度的利用^[24]. 多结太阳能电池自问世以来, 由于其极高的转换效率, 一直是太阳能电池领域研究的重要内容, 许多文献曾经计算过多结太阳能电池的理论极限转换效率, 其结果基本一致, 也就是当带隙实现最佳匹配, 在1 sun(或全聚光)条件下, 二结、三结、四结太阳能电池的极限转换效率分别可以达到44.3%(59.7%), 50.1%(67%)和54%(71%), 并且预测当结数无限增大时, 转换效率甚至可达65.4%^[25]. 由此可见, 在无穷节太阳能电池下, 即使可以吸收全谱的太阳光, 仍然有34.6%的能量无法转化成电能. 正如之前的讨论, 这些能量消耗在不可避免的黑体辐射和电子-空穴辐射复合的过程中.

在不同材料的多结太阳能电池中, 基于Ⅲ-V族材料的多结太阳能电池拥有较大的光吸收系数和优异的光谱响应, 引起了太阳能电池研究领域广泛的兴趣并获得了极快的发展. 例如, 三结GaAs太阳能电池, 其设计结构为3个不同带隙的子电池(GaInP/GaInAs/Ge)串接, 其中GaInP带隙为1.9 eV, GaInAs及Ge分别为1.4和0.7 eV. 当光照射到电池上时, 从上到下3个子电池分别吸收能量大于1.9 eV的光子、能量在1.4~1.9 eV范围内的光子、以及能量在0.7~1.4 eV内的光子, 并转化为电能, 拓展了可吸收的光子范围^[26,27]. 2000年, Cotal等人^[28]首次制成了三结GaAs太阳能电池, 在聚光条件下转换效率达到32.3%, 人们很快意识到多结太阳能电池的巨大潜力. 此后, 效率不断被刷新, 2014年该记录被Dimroth等人^[23]提高到44.7%. 同时四结、五结甚至更高结的太阳能电池正在研究中, 可以预计多结太阳能电池的转换效率将会继续上升. 在聚光条件下, 无穷多节太阳能电池的

极限效率为86%, 这是目前太阳能电池能够达到的最高理论效率^[29].

3.2 中间带太阳能电池

中间带太阳能电池是在半导体材料的禁带区域引入连续的电子能带, 即在导带和价带之间增加1个能带^[30,31]. 对于半导体材料, 光子能量必须大于带隙能量才能被价带上的电子吸收并跃迁到导带上. 而引入中间带后, 当光照射到半导体材料上时, 低于带隙能量的光子可以首先被价带上的电子吸收, 跃迁到中间带上, 再继续吸收光子, 达到足够的能量后再次跃迁到导带上. 中间带太阳能电池结合了多节太阳能电池的优点, 能够吸收低于带隙能量的光子, 可以使电池在输出电压没有降低的情况下提高光电流, 提高转换效率^[32,33].

中间带的材料必须具备下列性质: (1) 价带到导带的吸收系数比价带到中间带的吸收系数大, 价带到中间带的吸收系数比中间带到导带的吸收系数大; (2) 中间带必须是半满的, 且应有足够的电子空穴对浓度, 从而能够满足电子从价带到中间带的跃迁和中间带到导带跃迁的要求^[34,35].

量子点和量子点超晶格被认为是最有希望实现中间带太阳能电池的材料. 目前研究最为活跃的是以Ⅲ-V族和Ⅱ-VI族化合物材料制备而成的量子点为活性层的太阳能电池. 根据理论计算, 量子点中间带太阳能电池的极限转换效率在1 sun和全聚光条件下分别可以达到46%和63.2%^[36]. 如果考虑无穷多中间带的存在, 中间带太阳能电池的效率可达77.2%^[37]. 对于中间带太阳能电池, 目前来说提高光吸收和载流子寿命是提高电池效率的关键.

3.3 多激子太阳能电池

多激子过程是指把1个高能量光子转换为多个电子-空穴对的过程^[38], 在太阳能电池中可以使光电流增大, 提高光电转换效率^[39,40]. 多激子产生需要的条件包括: (1) 多激子产生的速度要大于热载流子冷却速度; (2) 材料需要有很强的光吸收能力, 碰撞离化后能产生大量多激子. 但是对于一般半导体材料, 热载流子的冷却速度非常快, 而且碰撞粒子还需同时满足能量和动量守恒, 很难达到多激子产生的要求^[41]. 量子点的出现解决了这些问题, 首先量子点的分裂能级结构可以延长热载流子的冷却时间; 其

表 2 标准空气质量地面谱AM1.5 条件下, 最高效率多结太阳能电池参数

Table 2 The parameters of multi-junction solar cells with maximum conversion efficiency under the standard air-mass AM1.5 terrestrial spectrum

	光照面积 (cm ²)	聚光 倍数	转换效率 (%)	文献
InGaP/GaAs/InGaAs	0.167	240	43.5	[14]
GaInP/GaInAs/Ge	287	365	40.4	[22]
GaInP/GaAs// GaInAsP/GaInAs	0.052	297	44.7	[23]

次,量子点在三维方向均受限制,其动量不再是一个好量子数,碰撞不需要满足动量守恒^[42].这种产生多激子的现象在PbSe、PbS量子点中都可以观察到^[43].研究发现,利用多激子产生机制,PbSe量子点电池的外部和内部量子效率分别达到了114%和130%,突破了1个光子产生1个电子-空穴对的S-Q效率极限.根据理论计算,在非聚光下,单结多激子太阳能电池的极限转换效率可以达到44.4%^[44].

3.4 其他新概念太阳能电池

其他类型的高效率太阳能电池还有许多,例如热载流子太阳能电池,对于太阳能电池而言,能量损失的很大一部分来自热载流子(拥有很高能量的光激发载流子)将能量传递给材料并以热量的形式散失^[45].热载流子电池的设计思想就是在热载流子冷却之前,通过一种吸收材料将其汇集到太阳能电池的两端电极,从而增加输出电压,提高能量转换效率.通过理论计算,热载流子电池在1 sun和全聚光条件下的极限转换效率可以达到66%和85%^[46].

再比如热光伏太阳能电池,其原理是光首先照

射到一个吸收/发射体上并加热,然后以特定波长辐射到电池表面,产生电能.这样可以避免不必要的能量损失.理论计算表明在1 sun和全聚光条件下,热光伏太阳能电池的极限转换效率可以达到54%和85%^[47].

4 结论与展望

对于传统单结太阳能电池,由于开路电压和短路电流的相互制衡,发展合适的带隙、强吸收系数、高迁移率的新材料是提高电池效率的先决条件.近年来我们惊喜地看到随着新材料和新技术的不断发展,尤其是CIGS太阳能电池和钙钛矿太阳能电池的不断发展,单结太阳能电池的效率越来越逼近S-Q效率极限.另一方面,随着多结太阳能电池、中间带太阳能电池、多激子太阳能电池等新概念太阳能电池的出现,太阳能电池效率的纪录在不断地被改写,研究人员不断地向太阳能电池效率的巅峰发起挑战.我们相信随着新概念和新技术的不断发展,太阳能电池效率的“极限”必将不断地被突破和改写,太阳能电池必将在人类社会发展的历史中做出重要的贡献.

参考文献

- Shockley W, Queisser H J. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *J Appl Phys*, 1961, 32: 510–519
- Nozik A J. Quantum dot solar cells. *Physica E*, 2002, 14: 115–120
- Luque A, Hegedus S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 130–168
- Zhao J, Wang A, Green M A, et al. Novel 19.8% efficient “honeycomb” textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells. *Appl Phys Lett*, 1998, 73: 1991–1993
- Deng W, Chen D, Xiong Z, et al. 20.8% PERC solar cell on 156 mm×156 mm P-type multicrystalline silicon substrate. *IEEE J Photovolt*, 2015: 1–7
- Masuko K, Shigematsu M, Hashiguchi T, et al. Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell. *IEEE J Photovolt*, 2014, 4: 1433–1435
- Green M A, Emery K, Hishikawa Y, et al. Solar cell efficiency tables (version 45). *Prog Photovoltaics*, 2015, 23: 1–9
- Zhou H, Chen Q, Li G, et al. Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells. *Science*, 2014, 345: 542–546
- Jackson P, Hariskos D, Wuerz R, et al. Properties of Cu (In, Ga)Se-2 solar cells with new record efficiencies up to 21.7%. *Phys Status Solidi Rapid Res Lett*, 2015, 9: 28–31
- Bozzola A, Kowalczewski P, Andreani L C. Towards high efficiency thin-film crystalline silicon solar cells: The roles of light trapping and non-radiative recombinations. *J Appl Phys*, 2014, 115: 094501
- Haschke J, Amkreutz D, Korte L, et al. Towards wafer quality crystalline silicon thin-film solar cells on glass. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2014, 128: 190–197
- Shalav A, Richards B S, Trupke T, et al. Application of NaYF₄:Er³⁺ up-converting phosphors for enhanced near-infrared silicon solar cell response. *Appl Phys Lett*, 2005, 86: 013505
- Trupke T, Shalav A, Richards B S, et al. Efficiency enhancement of solar cells by luminescent up-conversion of sunlight. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2006, 90: 3327–3338
- Sasaki K, Agui T, Nakaido K, et al. Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells. In: Dimroth F, Araki K, Anton I, eds. *AIP Conference Proceedings*. Melville: Amer Inst Physics, 2013. 22–25

-
- 15 Miller O D, Yablonovitch E, Kurtz S R. Strong internal and external luminescence as solar cells approach the Shockley-Queisser limit. *IEEE J Photovolt*, 2012, 2: 301–311
 - 16 Green M A, Ho-Baillie A, Snaith H J. The emergence of perovskite solar cells. *Nat Photonics*, 2014, 8: 506–514
 - 17 Snaith H J. Perovskites: The emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells. *J Phys Chem Lett*, 2013, 4: 3623–3630
 - 18 Kim H S, Im S H, Park N G. Organolead halide perovskite: New horizons in solar cell research. *J Phys Chem C*, 2014, 118: 5615–5625
 - 19 Service R F. Energy technology. Perovskite solar cells keep on surging. *Science*, 2014, 344: 458
 - 20 Park N G. Organometal perovskite light absorbers toward a 20% efficiency low-cost solid-state mesoscopic solar cell. *J Phys Chem Lett*, 2013, 4: 2423–2429
 - 21 Almansouri I, Baillie A H, Green M A. Ultimate efficiency limit of single-junction perovskite and dual-junction perovskite/silicon two-terminal devices. *Jpn J Appl Phys*, 2015, 54: 08KD04
 - 22 Green M A, Keevers M J, Thomas I, et al. 40% efficient sunlight to electricity conversion. *Prog Photovoltaics*, 2015, 23: 685–691
 - 23 Dimroth F, Grave M, Beutel P, et al. Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency. *Prog Photovoltaics*, 2014, 22: 277–282
 - 24 Mann S A, Garnett E C. Resonant nanophotonic spectrum splitting for ultrathin multijunction solar cells. *ACS Photonics*, 2015, 2: 816–821
 - 25 Marti A, Araújo G L. Limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion in multigap systems. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 1996, 43: 203–222
 - 26 King R R, Bhushari D, Larrabee D, et al. Solar cell generations over 40% efficiency. *Prog Photovoltaics*, 2012, 20: 801–815
 - 27 Kerestes C, Polly S, Forbes D, et al. Fabrication and analysis multijunction solar cell with an InGaAs quantum dots junction. *Prog Photovoltaics*, 2014, 22: 1172–1179
 - 28 Cotal H L, Lillington D R, Ermer J H, et al. Highly Efficient 32.3% monolithic GaInP/GaAs/Ge triple junction concentrator solar cells. Colorado: Proceedings of Program and Proceedings, 2000. 111–112
 - 29 Vos A D. Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells. *J Phys D Appl Phys*, 1980, 13: 839–846
 - 30 Sogabe T, Shoji Y, Ohba M, et al. Intermediate-band dynamics of quantum dots solar cell in concentrator photovoltaic modules. *Sci Rep*, 2014, 4: 1146–1149
 - 31 Sang L W, Liao M Y, Liang Q F, et al. A multilevel intermediate-band solar cell by InGaN/GaN quantum dots with a strain-modulated structure. *Adv Mater*, 2014, 26: 1414–1420
 - 32 Datas A, López E, Ramiro I, et al. Intermediate band solar cell with extreme broadband spectrum quantum efficiency. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 157701
 - 33 Yoshida M, Amrania H, Farrell D J, et al. Progress toward realizing an intermediate band solar cell-sequential absorption of photons in a quantum well solar cell. *IEEE J Photovolt*, 2014, 4: 634–638
 - 34 Luque A, Martí A. The intermediate band solar cell: Progress toward the realization of an attractive concept. *Adv Mater*, 2010, 22: 160–174
 - 35 Luque A, Martí A, Stanley C. Understanding intermediate-band solar cells. *Nat Photonics*, 2012, 6: 146–152
 - 36 Luque A, Martí A, Stanley C, et al. General equivalent circuit for intermediate band devices: Potentials, currents and electroluminescence. *J Appl Phys*, 2004, 96: 903–909
 - 37 Brown A S, Green M A. Impurity photovoltaic effect: Fundamental energy conversion efficiency limits. *J Appl Phys*, 2002, 92: 1329–1336
 - 38 Beard M C, Luther J M, Semonin O E, et al. Third generation photovoltaics based on multiple exciton generation in quantum confined semiconductors. *Acc Chem Res*, 2012, 46: 1252–1260
 - 39 Ono M, Nishihara T, Ihara T, et al. Impact of surface ligands on the photocurrent enhancement due to multiple exciton generation in close-packed nanocrystal thin films. *Chem Sci*, 2014, 5: 2696–2701
 - 40 Sun J, Yu W, Usman A, et al. Generation of multiple excitons in Ag₂S quantum dots: Single high-energy versus multiple-photon excitation. *J Phys Chem Lett*, 2014, 5: 659–665
 - 41 Davis N J L K, Böhm M L, Tabachnyk M, et al. Multiple-exciton generation in lead selenide nanorod solar cells with external quantum efficiencies exceeding 120%. *Nat Commun*, 2015, 6
 - 42 Nozik A J, Beard M C, Luther J M, et al. Semiconductor quantum dots and quantum dot arrays and applications of multiple exciton generation to third-generation photovoltaic solar cells. *Chem Rev*, 2010, 110: 6873–6890
 - 43 Ellingson R J, Beard M C, Johnson J C, et al. Highly efficient multiple exciton generation in colloidal PbSe and PbS quantum dots. *Nano Lett*, 2005, 5: 865–871
 - 44 Hanna M C, Nozik A J. Solar conversion efficiency of photovoltaic and photoelectrolysis cells with carrier multiplication absorbers. *J Appl Phys*, 2006, 100: 074510
 - 45 Hirst L C, Lumb M P, Hoheisel R, et al. Spectral sensitivity of hot carrier solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2014, 120: 610–615
 - 46 Ross R T, Nozik A J. Efficiency of hot-carrier solar energy converters. *J Appl Phys*, 1982, 53: 3813–3818
 - 47 Harder N P, Würfel P. Theoretical limits of thermophotovoltaic solar energy conversion. *Semicond Sci Technol*, 2003, 18: 151

Discussion about ultimate efficiency of solar cells

QIAN ZhiCheng^{1,2}, DAI Xiao², SHI Peng¹, YIN WanJian², LOU YanHui² & ZOU GuiFu²

¹Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

²College of Physics, Optoelectronics and Energy of Soochow University and Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Suzhou 215006, China

Solar energy is considered as one of the most promising green energy due to clean, safe, long life, and renewable advantages. Solar cell is an electrical device that converts solar energy directly into electric power on the basis of photovoltaic effect. Fritts built the first solar cell in 1883. Although the initial efficiency was only 1%, it has been exciting to know that the power conversion efficiency of solar cells is endlessly improved since it was reported. Up to now, the efficiency of commercial silicon solar cell is between 10%–18%. The latest research shows that the best efficiency of perovskite solar cell has been improved to be over 20% within several years. As it is well known, the maximum power conversion efficiency of single-junction solar cells are only around 33% according to the Shockley-Queisser limit. With the development of new materials and high technologies, one issue is emerging: What is the ultimate efficiency of solar cells? The highest efficiency of solar cell is possible to break the Schockley-Queisser limit? How to further enhance the efficiency of solar cell? All the questions are hard to answer at present. Surrounding these concerns, this article presents a brief review about the efficiency limits of different solar cells. It might help to understand the ultimate efficiency of solar cells. The details address the basic principle, advantages and disadvantages of single-junction, multi-junction and other new concept solar cells regarding the power conversion efficiency. The review also includes the solar cell materials involving silicon, compound, perovskite, quantum dot, hybrid materials, etc. Finally, we look ahead into the prospect of new concept solar cells and the maximum power conversion efficiency.

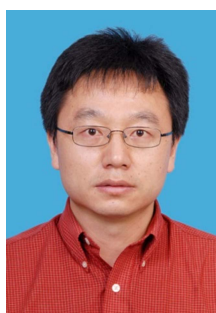
solar cell, power conversion efficiency, bandgap

doi: 10.1360/N972015-01328



史鹏

2005 年毕业于西安交通大学固体电子与微电子学专业并获得博士学位, 现任西安交通大学电子与信息学院电子科学与技术系副教授、国际电介质研究中心研究员, 硕士研究生导师。主要致力于功能薄膜材料与微器件的制备与性能研究, 发表相关学术论文 70 余篇。



邹贵付

江苏省特聘教授, 博士生导师, 国家青年“973”计划首席科学家, 国家优秀青年科学基金和江苏省杰出青年科学基金获得者。毕业于中国科学技术大学获得理学博士学位, 随后分别在瑞典于默奥大学和美国能源部 Los Alamos 国家实验室从事研究工作。目前主要研究方向包括新型光伏材料设计、合成及应用开发; 化学溶液生长外延功能薄膜及其微结构组装; 复合碳材料的能源储存及转化探索。