

文章编号: 1001-3806(2012)05-0696-04

## 激光辐照单晶硅电池转换效率的研究

杨鹏 杨雁南\*

(南京航空航天大学理学院应用物理系, 南京 211106)

**摘要:** 为了研究激光照射下单晶硅电池的转换效率,在理想电池太阳光照射下极限转换效率研究方法的基础上,提出激光照射下理想电池转换效率的计算方法,并推导出解析表达式,通过计算和实验测量研究了激光波长、激光强度、环境温度等因素对转换效率的影响。结果表明,相对太阳光,单晶硅电池对单色激光的光电转换效率明显提高,最高转换效率可达 27.7%。该结果对激光电力传输应用的研究具有一定的参考价值。

**关键词:** 激光技术; 激光电力传输; 单晶硅电池; 转换效率

中图分类号: TN249 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.05.031

## Research of conversion efficiency of monocrystalline silicon solar cells under laser irradiation

YANG Peng, YANG Yan-nan

(Department of Physics, School of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In order to study the conversion efficiency of monocrystalline silicon solar cell under laser irradiation, a method to calculate the efficiency of ideal solar cells under laser light was put forward based on the method usually used under solar spectrum. Analytical expressions and experimental measurements were used to describe the relation between the conversion efficiency and laser wavelength, incident intensity and ambient temperature, etcetera. Research shows that, under the laser light conversion efficiency will be improved obviously, the maximum conversion efficiency is up to 27.7%. All of these have certain reference value to the application of laser power transmission.

**Key words:** laser technique; laser power transmission; monocrystalline cells; conversion efficiency

### 引言

无线电力传输技术<sup>[1-3]</sup>是一种利用在自由空间传播的电磁波来传输电能的技术。从实用的角度讲,无线输电和有线输电各有千秋,作为地面长距离输电或家用电器的长期用电,有线输电优点显著,但在有些特殊场合,如太空领域中人造卫星、航天器之间的能量传递则需要采用无线电力传输。科学家们甚至设想,为提高太阳能的利用率,未来可以在太空建立“太阳能发电站”<sup>[4]</sup>,将获得的电能再采用无线电力传输技术“隔空”传输到地球。无线电力传输技术的最大困难在于电磁波的弥散与不期望的吸收与衰减。由于电磁波波长越短,衍射越小,从而方向性越好,因此,解决弥散的最直接办法是使用波长短、衍射小的电磁波——

微波或激光传输。目前研究者已确认工作频率为 2.45GHz 的微波在穿过大气层时损耗较小,可用于远程能量传输,但由于微波的发射、接收系统结构复杂、庞大,对通讯有干扰等缺点,在有些场合,如对微小卫星、微型飞行器等小型器件的能量传输则不宜使用。激光方向性强、能量集中、易实现远距离传输,光电转换所需发射和接收设备重量、体积比微波系统小得多,且不存在干扰通信卫星的风险,因此特别适用于人造卫星、航天器之间的能量传输。

基于上述应用背景,目前欧美等发达国家都已开展了关于激光电力传输的研究。其中代表性的工作有:2005年美国国家航空和宇宙航行局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)马歇尔空间飞行中心的科学家利用波长 940nm 输出功率 500W 的强激光照射贴在微型飞行器表面的三结 Ga:In:P<sub>2</sub> 光电池,为与激光器相距 15m 远的微型飞机传输电力,使输出功率为 6W 的微型电动机正常工作,带动飞机飞行<sup>[5]</sup>;2007年欧洲宇航防务集团(European Aeronautic Defense and Space Company, EADS)的工程师也利用激光远程充电的方法,为与激光器相距 250m 远、

基金项目:南京航空航天大学基本科研专项资助项目(Np2011029)

作者简介:杨鹏(1989-),男,硕士研究生,现从事激光应用方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: yangyn@nuaa.edu.cn

收稿日期:2012-02-20;收到修改稿日期:2012-03-02

长度为 20cm 的微型船——“漫步者”实施了电力传输<sup>[6]</sup>。类似的研究还有 NASA、美国环境和能源技术办公室及乌克兰联合进行的空间太阳能发电工作<sup>[7-8]</sup>，他们计划在未来的 50 年内，在地球同步轨道上建起一个太阳能发电站，再将能量以集中的形式送向地面。EADS 太阳能利用团队的队长弗兰克认为，目前可行的电力传输方法有两种：激光（EADS 的首选）和微波（日本研究者的最爱）。他还表示，EADS 之所以倾向于激光电力传输是因为它需要的轨道设备小，且激光能量密度大，方向性好，在传输远距离后仍能够很好地控制光束的侧面扩散，同时也不会对附近区域的无线电通信和航海系统造成干扰。

激光电力传输技术涉及到大功率激光束在空气中的传输、光电池对照射单色激光的光电转换效率等问题。目前，国内关于激光电力传输的研究还鲜有报道，但基于太阳能发电的广泛需求，已有多位研究者对单节和多节光电池在太阳光下的转换效率进行过理论分析和实验测量<sup>[9-10]</sup>。本文中借鉴他们的相关工作，创新性地采用热力学理论中的细致平衡原理，研究了激光照射下单晶硅电池的理论转换效率问题，推导出解析表达式。同时，采用不同波长、不同强度激光照射可承受最大光强为标准太阳光强 15 倍的单晶硅电池，对光电池的转换效率又进行了实验测量，并对理论计算结果和实验测量结果进行了分析。结果表明，激光照射下光电池的转换效率与入射激光波长、强度有关，在一定光强下，当入射光子的能量与光电池材料的带隙宽度匹配时，其光电转换效率明显高于太阳光下的转换效率。该结果对激光电力传输应用的研究具有一定的参考价值。

## 1 理论推导

### 1.1 理论推导

根据热力学理论，当光电池满足如下假设时，可作为理想电池处理。

(1) 电池材料的能隙宽度  $E_g > k_B T_c$ ，其中  $k_B$  为玻尔兹曼常数， $T_c$  为光电池的温度。电池有足够厚度来吸收光子能量范围为  $(E_g, \infty)$  的全部光子。

(2) 电池仅吸收能量  $E > E_g$  的光子，一个光子产生一个电子-空穴对的概率为 1。导带与价带的光生载流子与环境温度处于准热平衡状态。

(3) 电池中光生载流子可实现完全的分离，且载流子迁移率为无限大，即载流子可以无损地输运并被输出端收集。

(4) 系统满足细致平衡原理，因此复合辐射是电池的唯一复合机制。复合辐射发射的光子能量通常略大于  $E_g$ ，导致电池有个再吸收过程，因此，只有净复合

辐射对效率有影响。

(5) 电池具有理想的电接触，即表面复合为 0。

对于理想电池在激光照射下的净复合电流密度由下式给出<sup>[11]</sup>：

$$J_r = qN_r = q \frac{2n_s F_c}{h^3 c^2} \times \int_{E_g}^{\infty} \left[ \frac{E^2}{\exp\left(\frac{E - qV}{k_B T_c}\right) - 1} - \frac{E^2}{\exp\left(\frac{E}{k_B T_c}\right) - 1} \right] dE \quad (1)$$

式中  $N_r$  为电池向外辐射的光子流密度， $q$  为单电子电荷， $h$  为普朗克常量， $c$  为真空中光速， $V$  为电池的输出电压， $F_c$  是电池光发射的几何因子，这里  $F_c = \pi/n_s^2$ ， $n_s$  是电池材料的折射率；由于电池处在热平衡状态，电池温度  $T_c$  等于环境温度，默认取室温 300K。为方便表达和计算，令  $A = 2n_s F_c k_B T_c / (h^3 c^2) = 2.94 \times 10^{62}$ ，能被理想电池吸收的光子，其波长应满足  $\lambda \leq hc/E_g$ 。

由于  $e^{-(E - qV)/(k_B T_c)} \gg 1$ ， $e^{-E/(k_B T_c)} \gg 1$ ，(1) 式可化简为：

$$J_r = qN_r \cong q \frac{2n_s F_c}{h^3 c^2} \times \int_{E_g}^{\infty} [E^2 e^{(qV - E)/(k_B T_c)} - E^2 e^{-E/(k_B T_c)}] dE \quad (2)$$

将 (2) 式展开，舍弃高阶项，得电池的净输出电流为：

$$J = J_p - J_r = qN_p - qA \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_B T_c}\right) - 1 \right] \times \exp\left(\frac{-E_g}{k_B T_c}\right) (E_g^2 + 2k_B T_c E_g) \quad (3)$$

式中  $J_p$  为电池吸收入射激光光子产生的光生载流子等效电流密度， $N_p$  为单位时间内入射到光电池单位表面积的光子数。当输出功率取极值即输出最大功率时，应有：

$$d(JV)/dV = 0 \quad (qV > 0) \quad (4)$$

输出电压  $V$  的取值范围为  $(0, E_g)$ ，因此  $qV$  的最大值由下式确定：

$$N_p + A \exp\left(\frac{-E_g}{k_B T_c}\right) (E_g^2 + 2k_B T_c E_g) \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{qV}{k_B T_c}\right) - \frac{qV}{k_B T_c} \exp\left(\frac{qV}{k_B T_c}\right) \right] = 0 \quad (5)$$

从而求得最大转换效率为：

$$\eta = \frac{V(J_p - J_r)}{N_p h \omega} = \frac{V [qN_p - qA (e^{\frac{qV}{k_B T_c}} - 1) e^{\frac{-E_g}{k_B T_c}} (E_g^2 + 2k_B T_c E_g)]}{N_p h \omega} \quad (6)$$

式中，入射激光光子频率  $\omega = c/\lambda$ 。在理论计算中，统一取 1 倍太阳光强为太阳能测试标准 AM1.5（定义光线通过大气的实际距离与大气垂直厚度的比值为 air mass，

AM) 下,地球表面平均太阳能密度大约为  $0.1 \text{ W/cm}^2$ , 即  $1 \text{ sun} = 0.1 \text{ W/cm}^2$ 。

对于实际光电池,由于存在电池表面对入射光的反射损失,材料有一定的量子效率和光谱响应以及载流子寿命有限和非本征损失等因素,需要对理想电池的转换效率做一些合理修正。对于本文中研究的情况,由于分别采用了不同波长的激光照射单晶硅电池,且照射激光功率密度普遍较高,因此,光电池对不同波长的入射激光量子效率、光谱响应不同,高功率密度产生的光生电流较大,从而引起的热阻较大。考虑到这两方面的因素,引入修正因子  $\sigma$  和  $\zeta$ ,对(6)式进行了修正,为与(6)式区分,这里转换效率用  $\eta_1$  表示:

$$\eta_1 = \frac{\sigma(V - \xi)(J_p - J_r)}{N_p h \omega} \quad (7)$$

式中  $\sigma$  为硅光电池的相对响应度;  $\zeta$  为电池内阻引起的压降,其大小与电流成正比例关系,其取值范围为  $[0, V]$ 。

## 1.2 理论计算结果

采用(6)式和(7)式,首先计算了当入射激光的光子能量大于单晶硅电池能隙宽度时,光电池对不同波长入射激光的转换效率,所得结果见图1。

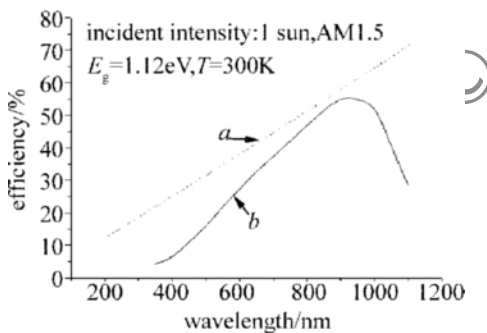


Fig. 1 Monocrystalline cells' theoretical efficiency versus wavelength for solar concentrations of 1 sun

a—ideal solar cell b—correctional solar cell

由曲线 *a* 可知,对于理想电池,转换效率随入射激光波长的增加线性增加,这主要是因为当入射光的强度给定时,光子的个数与波长成反比,即  $I = N_p hc/\lambda$ , 波长越长,光子个数越多,打出的光电子个数就越多,因此转换效率就越高。而加入实际光电池的光谱响应修正后,所得结果见曲线 *b*,光电池在 900nm 附近达到最高转换效率,这一结论提示在实际应用中,对于入射光子能量大于光电池能隙宽度的激光,有一个最佳的激光波长。

采用(6)式和(7)式,还计算了能隙宽度与单晶硅电池相同的理想电池对不同强度入射激光的转换效率,所得结果见图2。

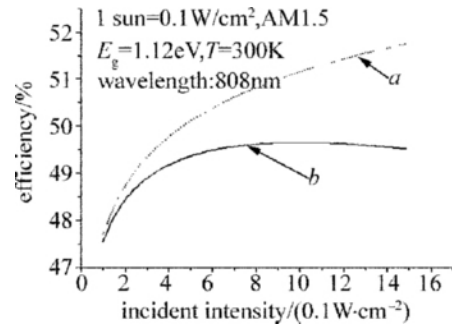


Fig. 2 Monocrystalline cells' theoretical efficiency versus incident intensity for wavelength of 808nm

a—ideal solar cell b—correctional solar cell

从曲线 *a* 可以看出,随着入射光强的增加,理想电池的转换效率先是显著增加,而后缓慢增加。这是因为入射光强增加时,辐射复合在总入射能量中所占比例下降,其最大值即为辐射复合为 0 时的转换效率,但随入射光强的增加,转换效率只能逐渐趋近于该值。而考虑高强度激光照射下热阻效应较为严重的因素加以修正后,所得结果见曲线 *b*,对波长为 808nm 的入射激光,转换效率在光强较弱时随入射光强的增强而增加,在 10 倍太阳光强附近达到最大值,随后下降。

## 2 实验结果与分析

采用如图3所示的实验装置,从实验上研究了单晶硅光电池对不同波长、不同光强激光的转换效率,并与利用(7)式计算的结果进行了比较。

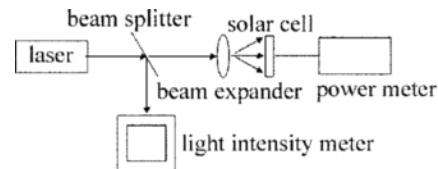


Fig. 3 Brief diagram of experimental device

实验中分别采用波长为 532nm、808nm 和 980nm 的固体、半导体激光器,输出功率连续可调,最大输出功率均为 5.4W;单晶硅光电池面积为  $1.5 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$ ,可承受最大光强为 15 倍太阳光标准光强;扩束镜的透光率为 95%,可将激光均匀照射整个光电池表面。实验测量的光电池转换效率随 3 种不同波长激光入射光强的变化关系如图4所示。

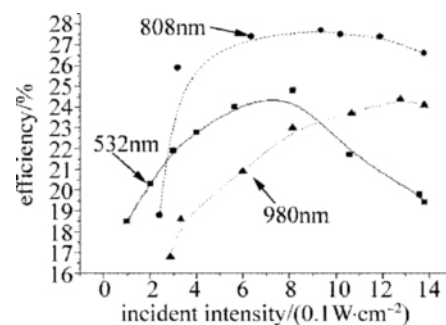


Fig. 4 Monocrystalline cells' efficiency versus incident intensity

从图4可以看出,对波长为532nm的激光,当入射光强为8个太阳光强度时达到最大值,最大转换效率为24.8%;对波长为808nm的激光,当入射光强为10倍太阳光强时达到最大值,最大转换效率为27.7%;对波长为980nm的激光,当入射光强为13倍太阳光强时达到最大值,最大转换效率为24.9%。该结果与图1的理论计算基本吻合。

另外,从图4可以看出,实际光电池在光强较弱时转换效率比图2的计算结果要小得多,这主要是因为光强较弱时,入射光子个数较少,产生的光生载流子浓度较低,由电池中的杂质或晶格缺陷导致的载流子在扩散过程中复合现象明显所致。

由图4中还可以看出,实验测量的转换效率较理论计算的效率要低得多,这主要是在实际电池光电转换过程中,无论对于何种波长的入射光,还存在各种非本征损失,而在理论计算转换效率时未被考虑在内。

由于在实验测量时观察到光电池被强激光长时间照射时温度升高,转换效率会相应地下降的现象,利用实验室现有条件,还对转换效率随温度的变化关系作了测量,并与(7)式的计算结果进行比较。图5为理论计算的转换效率与实验测量的转换效率随环境温度的变化关系曲线。由图可知,两者均随环境温度的升高而下降。这是因为温度升高会增加高能态光生载流子的不稳定性,加速电池的自发辐射,暗电流增大,导致效率下降。另外实际电池的下降速率较计算结果略慢,这主要是由于实际电池随着温度升高,本征载流子浓度急剧增加,饱和电流中扩散电流分量增加,延缓了电池效率下降的速率。

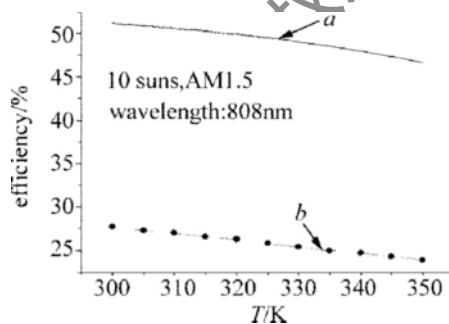


Fig. 5 Monocrystalline cells' efficiency versus temperature for wavelength of 808nm

a—ideal solar cell b—empirical curve

### 3 结论

作者将热力学理论中的细致平衡原理用于研究激光照射下单晶硅电池转换效率问题,并从实验上进行了测量。理论计算和实验测量表明:采用单色性良好的激光,当激光光子能量与光电池材料的带隙宽度匹配时,光电池有较高的转换效率。在激光功率密度为

10倍太阳光强时,最大转换效率可达27.7%。由于本电池标称对太阳光的转换效率最大值为16%,因此如果采用激光充电,在获得同样电能的情况下,光电池的使用面积仅约为太阳光照射时的1/17,这对于微型飞行器、微小卫星等器件的充电具有重要的应用价值。本文中采用的单晶硅电池价格较低,易于大规模应用,缺点是散热性能较差,入射光功率密度较大时温度升高,会导致转换效率下降。

此外,新型的高倍聚光电池砷化镓(GaAs)因具有更高的转换效率、更强的抗辐射能力和更好的耐高温性能,使其在光伏发电领域的应用比例日益增大。不同种类GaAs电池对激光转换效率的研究将另文报道。

### 参考文献

- [1] GREEN A W, BOYS J T. 10kHz inductively coupled power transfer—concept and control [C]//The Fifth International Conference on Power Electronics and Variable-speed Drives. London, UK: IEEE, 1994: 694-699.
- [2] CHENG K W E, LU Y. Development of a contactless power converter [C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. Bangkok, Thailand: IEEE, 2002: 786-791.
- [3] ZHANG M Ch, WANG J H, SHI Y W. Review of the wireless power transmission technology [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2009, 26(5): 485-488 (in Chinese).
- [4] COUGNET C, SEIN E, CELESTE A, *et al.* Solar power satellites for space exploration and applications [C]//The 4th International Conference on Solar Power From Space-SPS'04, Together with The 5th International Conference on Wireless Power Transmission - WPT 5 (ESA SP-567). Granada, Spain: European Space Agency, 2004: 151-158.
- [5] BLACKWELL T. Recent demonstrations of laser power beaming at DFRC and MSFC [C]//AIP Conference Proceeding Beamed Energy Propulsion. Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion. New York, USA: American Institute of Physics, 2005: 73-85.
- [6] HOFFMAN J M. How to get fuel to future interplanetary vehicles: beam it up to them with lasers [J]. Penton Publishing, 2007, 79(5): 78-88.
- [7] HOWELL J T, O'NEILL M J, FORK R L. Advanced receiver/converter experiments for laser wireless power transmission [C]//Solar Power From Space (SPS04) and 5th Wireless Power Transmission (WPT5) Conference. Granada, Spain: European Space Agency, 2004: 1-8.
- [8] DICKINSON R M. Wireless power transmission technology state of the art the first Bill Brown lecture [J]. Acta Astronautica, 2003, 53(4/10): 561-570.
- [9] HENRY C H. Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells [J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(8): 4494-4500.
- [10] HOVEL H J. High pressure in semiconductor physics I [M]. New York, USA: Academic Press, 1975: 77-99.
- [11] XIONG Sh Zh, ZHU M F. Fundamentals and applications of solar cells [M]. Beijing: Science Press, 2009: 569-577 (in Chinese).