

高倍聚光光伏模组中三结太阳能电池沿光轴方向光电性能与优化

连榕海 梁齐兵 舒碧芬 范畴 吴小龙 郭银 汪婧 杨晴川

Performance and optimization research of triple-junction solar cell along the optical axis direction on the HCPV module

Lian Rong-Hai Liang Qi-Bing Shu Bi-Fen Fan Chou Wu Xiao-Long Guo Yin Wang Jing Yang Qing-Chuan

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 148801 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.148801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.148801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Cu₂ZnSnS₄ 晶界性质与光伏效应的第一性原理研究](#)

[First-principles studies on the properties of Cu₂ZnSnS₄ grain-boundaries due to photovoltaic effect](#)

物理学报.2015, 64(23): 238801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.238801>

[基于粒子群优化支持向量机的太阳能电池温度预测](#)

[Solar cell temperature prediction model of support vector machine optimized by particle swarm optimization algorithm](#)

物理学报.2015, 64(8): 088801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.088801>

[三结太阳能电池在非均匀光照下光斑强度和覆盖比率的优化研究](#)

[Optimization of light spot intensity and coverage to a triple-junction solar cell under non-uniform illumination](#)

物理学报.2014, 63(16): 168801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.168801>

[与太阳能电池研究相适配的双原点坐标系](#)

[Dual-origin coordinate system for solar cells](#)

物理学报.2014, 63(11): 118801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.118801>

[平板集热太阳热电器件建模及结构优化](#)

[Modelling and structure optimization of flat-panel thermal concentrated solar thermoelectric device](#)

物理学报.2013, 62(3): 038802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.038802>

高倍聚光光伏模组中三结太阳能电池沿光轴方向 光电性能与优化*

连榕海 梁齐兵 舒碧芬[†] 范畴 吴小龙 郭银 汪婧 杨晴川

(中山大学工学院, 太阳能系统研究所, 广州 510006)

(2016年3月28日收到; 2016年4月10日收到修改稿)

目前, 在高倍聚光光伏模组设计中, 由于对菲涅耳透镜聚光后各波段的光强分布及其非均匀特性缺乏研究和认识, 通常认为在菲涅耳透镜的聚光焦平面处多结太阳能电池输出功率最大. 本文通过光线跟踪模拟的方法, 计算并分析菲涅耳透镜聚光下不同波段的光照能量分布和非均匀特性. 同时, 结合三结太阳能电池电路网络模型, 研究在高倍聚光光伏模组中, 沿光轴方向不同位置处三结太阳能电池的发电性能. 结果表明: 模组输出功率最高位置在焦平面沿光轴方向上下两侧的位置, 优化后模组输出功率比常规设计提高20%以上. 该模拟结果得到了实验结果的验证.

关键词: 聚光光伏, 菲涅耳透镜, 三结太阳能电池, 非均匀光照

PACS: 88.40.fc, 88.40.fr, 88.40.jp, 88.40.hj

DOI: 10.7498/aps.65.148801

1 引言

高倍聚光光伏系统用相对廉价的透镜来取代大面积昂贵电池的使用, 节约光伏发电成本, 近年来受到广泛的关注. 目前高倍聚光光伏模组中使用的太阳能电池主要是基于III-V族材料的多结电池, 这种电池是目前所有太阳能电池中惟一效率能超过40%的. 但是在实际的模组中, 由于聚光元件非理想性以及其他复杂因素, 其光电转换效率却远没达到这么高. 其中到达电池表面的光照分布非常不均匀, 严重影响模组的性能表现^[1,2].

三结电池是目前最常见的一种多结电池, 由三个p-n结串联而成, 每个子电池吸收不同波段的光^[3-6]. 菲涅耳透镜是在聚光光伏组件中广泛采用的聚光装置^[7,8]. 菲涅耳透镜有着各种设计^[9,10], 这些设计集中在提高透镜的光学效率上, 从而提高照射在电池上的光照能量, 但电池的发电效率不仅和光照能量有关, 还和光照分布有重要关系. 根

据文献^[3]中对三结电池外量子效率的测量, 太阳光谱中对应电池三个结的波长范围分别为: 短波段, 300—700 nm; 中波段, 700—900 nm; 长波段, 900—1700 nm. 不同波段的光在通过菲涅耳透镜时, 由于折射率不同, 因此在光轴各个位置的光照分布是非均匀的. 由于三结电池对光的吸收特性, 光轴上光照分布的非均匀性必然会对电池性能造成影响. 而在光轴上, 由于菲涅耳透镜的设计焦平面位置是光照强度最集中的地方, 因此其非均匀程度最大, 必然会对电池的效率产生一定的影响.

德国的Marc等^[11]在室外测试他们新开发的四结电池的时候就发现了在透镜设计焦平面处电池的输出电流略有下降, 但没有作进一步研究. 本文针对这个问题, 运用电池电路网络模型^[12-18]以及光线追踪模拟^[19], 计算不同波段的光照能量分布, 并用该光照分布作为电池电路网络模型的输入, 分析电池位于光轴上不同位置上的光照分布和电池发电性能, 给出不同波段光照分布及电池性能随光轴位置的变化规律.

* 广东省自然科学基金(批准号: 2014A030311050)和广东省重大科技专项(批准号: 2013A011402005)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: shubifen@163.com

由于模拟使模组在单一变量的情况下进行假设, 而室外的条件很复杂, 有各种影响因素, 为了验证模型的可靠性, 必须通过室外实验来进行验证.

因此, 建立了一个具备高精度的室外测试平台, 在此平台上, 能够改变电池与透镜在光轴上的相对位置, 测试光轴不同位置电池的性能表现来验证模拟结果的准确可靠性.

2 理论模型建立

2.1 三结太阳电池等效电路理论模型

图1为GaAs三结电池的基本半导体结构^[3](图1(a))及相应的等效电路(图1(b)). Ga_{0.50}In_{0.50}P, Ga_{0.99}In_{0.01}As, Ge三种材料分别构成电池的上、中、下三个p-n结, 各个p-n结通过隧道二极管连接. 三结电池的三个结相当于三个太阳电池, 将各个子电池用双二极管模型代替, 可得到如图1(b)所示的等效电路. 因实际电池中并联电阻通常很大, 故在多结电池的等效电路中往往忽略并联电阻. 在图1(b)中, I_{Lt} , D_{1t} , D_{2t} 分别代表上层p-n结对应的电流源及两种载流子复合电池的二极管模型, 同理, I_{Lm} , D_{1m} , D_{2m} 代表中层p-n结模型的电路元件, I_{Lb} , D_{1b} , D_{2b} 代表下层p-n结模型的电路元件; R_{tt} 表示上层和中层p-n结之间的隧

道结等效的电阻, R_{tb} 表示中层和下层p-n结之间的隧道结等效电阻; R_s 表示串联电阻, R_b 表示电池基体电阻, R_L 表示负载电阻. 三结电池相当于三个单结太阳电池的串联, 各个p-n结用独立的电流源及二极管代替, 各结之间的隧道二极管在计算精度要求不高的情况可用电阻代替.

根据图1(b)所示的等效电路, 可以得到三结电池的电流电压关系为:

$$\begin{cases} I = I_{Lt} - I_{0t1} \left(\exp \frac{qV_t}{kT} - 1 \right) \\ \quad - I_{0t2} \left(\exp \frac{qV_t}{2kT} - 1 \right), \\ I = I_{Lm} - I_{0m1} \left(\exp \frac{qV_m}{kT} - 1 \right) \\ \quad - I_{0m2} \left(\exp \frac{qV_m}{2kT} - 1 \right), \\ I = I_{Lb} - I_{0b1} \left(\exp \frac{qV_b}{kT} - 1 \right) \\ \quad - I_{0b2} \left(\exp \frac{qV_b}{2kT} - 1 \right), \\ V + I(R_s + R_b + R_{tt} + R_{tb}) \\ = V_t + V_m + V_b, \end{cases} \quad (1)$$

式中 I_{0t1} , I_{0t2} , I_{0m1} , I_{0m2} , I_{0b1} , I_{0b2} 分别为各层p-n结二极管的反向饱和电流, V_t , V_m , V_b 为各层二极管两端电压.

由(1)式可以看到, 相对于单结电池的电流电压关系, 三结电池的更为复杂, 但决定该关系式的基本参数是与单结电池类似的, 不同的是要分别考虑三个结. 该基本参数为三个结的光生电流 I_{Lt} , I_{Lm} , I_{Lb} , 三个结的反向饱和电流 I_{0t1} , I_{0t2} , I_{0m1} , I_{0m2} , I_{0b1} , I_{0b2} , 以及串联电阻. 由(1)式可以看到, 串联电阻可统一表示为各个电阻之和, 即令 R_{ss} 表示统一的串联电阻, 则 $R_{ss} = R_s + R_b + R_{tt} + R_{tb}$.

三结电池作为一个半导体器件, 并不能单独测得各个结的短路电流, 故各个结的光生电流并不能通过测短路电流获得, 然而, 通过对三结电池测量外量子效率, 可以间接获得光生电流. 外量子效率(EQE)定义为在一定波长下, 光照在电池内部产生的对短路电流有贡献的光生载流子数目与入射到电池表面的光子数目之比, 即

$$EQE(\lambda) = \frac{I_L(\lambda)}{q\varphi(\lambda)}, \quad (2)$$

式中, $I_L(\lambda)$ 为波长 λ 下对短路电流有贡献的光生电流, q 为电子电量, $\varphi(\lambda)$ 为波长为 λ 的光子通

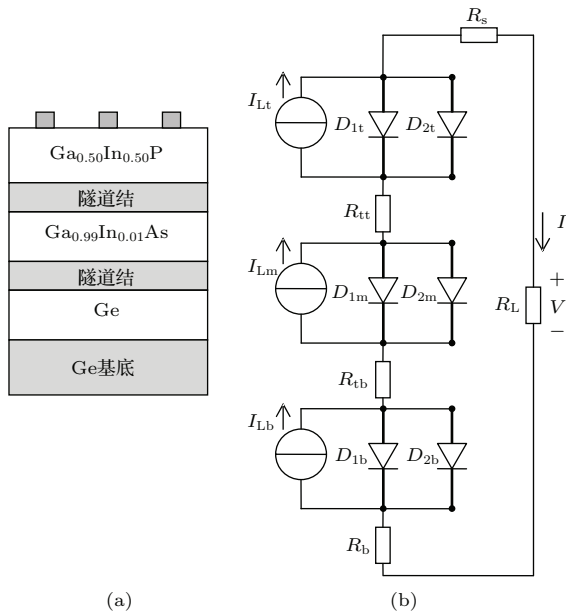


图1 (a) 三结电池基本半导体结构示意图; (b) 三结电池等效电路示意图

Fig. 1. (a) The semiconductor structure of a triple-junction solar cell; (b) the equivalent circuit for a triple-junction solar cell.

量. 由该式可以看到, 一定波长下的光生电流可以表示为

$$I_L(\lambda) = q\varphi(\lambda) \cdot \text{EQE}(\lambda), \quad (3)$$

设 $\theta(\lambda)$ 为光子通量谱分布密度, 即 $\varphi(\lambda) = \theta(\lambda)d\lambda$, 对 (3) 式沿波长积分, 可得

$$I_L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q\theta(\lambda) \cdot \text{EQE}(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

式中, $[\lambda_1, \lambda_2]$ 为光谱波长范围, 该式即为求各个结的光生电流的关系式.

与单结电池类似, 各个结的反向饱和电流依然可以通过拟合开路电压和光强关系曲线获得. 由于三结电池的串联电阻可统一用一个电阻表示, 故其确定方法依然可按照式

$$R_s = \frac{1}{I_{\text{mpp}}} \left[V_{\text{dark,mpp}} - V_{\text{mpp}} - (I_{\text{sc}} - I_{\text{mpp}}) \cdot \frac{V_{\text{dark,isc}} - V_{\text{oc}}}{I_{\text{sc}}} \right],$$

由明暗特性曲线求得.

2.2 适合于非均匀聚光光照的太阳电池电路模型

如上所述的电池的等效电路可以用于求解在均匀聚光下, 电池在一定聚光倍数和温度下的电学

特性. 然而在实际工作条件下, 聚光后光照是极其不均匀的. 当光照非均匀时, 电池特性与均匀光照下的特性不同, 这种不同并不能从等效电路中得到反映, 故等效电路不适用于求解电池在非均匀光照下的电学特性. 非均匀光照与均匀光照的不同在于是否考虑光照在电池表面的分布, 在考虑光照分布的前提下, 就不能把电池看成单一的电路元件. 对电池表面进行划分, 用不同位置的电路元件对应不同位置的光照是一种较为简单的考虑非均匀光照对电池影响的建模方法. 电路网络模型就是这样的一种方法. 电路网络模型基本思想是将电池划分为小电池阵列, 整个电池电路相当于小电池的并联电路, 每个小电池具有和电池整体相近似的电学特性, 故该模型也可以看成是对等效电路模型的一个扩展, 如图 2 所示.

本文为了提高模型精度, 小电池的 p-n 结采用 (1) 式所描述的双二极管模型. 对于多结太阳能电池, 小电池由双二极管模型串联组成. 各个 p-n 结并联有电流源, 用以表征光生电流. 各个电流源电流的大小由该位置处的光照决定, 故这种模型可用于计算非均匀光照下电池特性.

本文中采用的电池网络模型与作者前期工作 (见文献 [14]) 中所描述的相同. 其中, 本文采用电阻代替连接各层 p-n 结的隧道二极管.

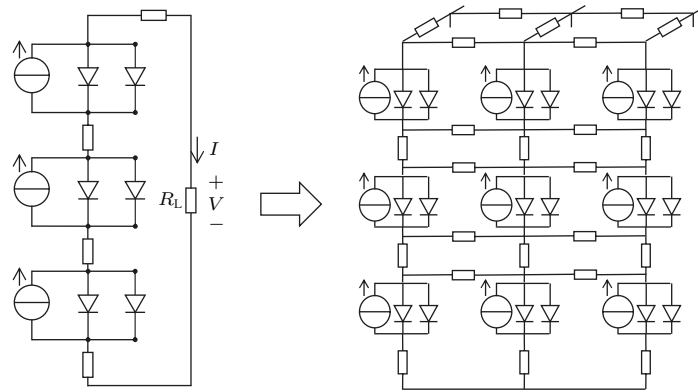


图 2 三结电池电路网络模型

Fig. 2. The circuit network model of a triple-junction solar cell.

2.3 菲涅耳透镜模型

这里采用等环宽平板型菲涅耳透镜进行光线跟踪模拟. 图 3 为该种菲涅耳透镜截面示意图, 其中 w 为环宽, h_i 为环高, 各环的环高根据透镜的设计焦距和设计波长计算得到. 菲涅耳透镜的材质通

常有 PMMA 和 SOG 两种 [14], 这里采用 PMMA 作为透镜材料, 透镜设计参数参见表 1.

光线跟踪程序为根据几何光学方法, 计算在一定折射率下每条光线的偏折位置及入射到某个表面的光功率. 对不同波长的光线, 透镜有不同的折射率. 根据三结电池光谱响应特性, 这里采用的光

谱范围为 300—1700 nm 进行计算. 对该光谱范围, 每 20 nm 取一个波长, 该波长的能量根据太阳光功率谱密度曲线, 以该波长为中心, 在正负 10 nm 区间积分求得, 每个波长的光单独跟踪计算.

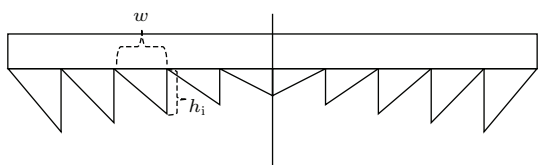


图3 等环宽平板型菲涅耳透镜截面示意图

Fig. 3. Schematic cross section of a flat Fresnel lens with identical ring width.

表1 菲涅耳透镜设计参数

Table 1. Design parameters of Fresnel lens.

参数	数值	参数	数值
厚度/mm	3	环宽/mm	0.5
设计焦距/mm	100	环数	80
设计波长/nm	500	材料	PMMA

3 计算结果及分析

3.1 菲涅耳透镜沿光轴方向的聚光特性

图4为根据光线跟踪程序求得的不同光轴位置处(焦平面为光轴100 mm处)的各波段的光斑宽度 w_{spot} . 由该图可以看到, 菲涅耳透镜下三个波段的光斑宽度随接收面位置的变化并不一致, 对短波段, 在98.1 mm处有最小光斑宽度2.0 mm; 对中波段和长波段, 最小光斑宽度基本相同, 为0.6 mm, 但两者位置略有不同, 中波段为101.5 mm, 长波段为102.1 mm. 与短波段对比, 中波段和长波段的变化较为一致, 这是由于PMMA的折射率随波长的变化在中波段和长波段减弱, 导致中波段和短波段的光近似为单一波长的光. 不同波段的光斑宽度的不同表明: 对一定大小的电池, 不同波段的光的非均匀程度并不一致. 在模组设计中, 电池摆放位置——焦平面(光轴位置100 mm)处, 短波段光斑宽度为3 mm, 中波段光斑宽度为1.2 mm, 而长波段为1.5 mm. 这意味着, 在焦平面处, 短波段光照面积明显大于中波段和长波段光照面积. 假设三结电池宽度为3 mm, 那么这时短波光在电池上光照基本均匀, 而中波和长波光在2 mm外没有光照. 这种光照不均匀性势必降低电池的光电性能. 假设三结电池宽度小于3 mm(比如说2 mm), 虽然能降低中波和长波光在电池上光照分布的非均匀性, 但却损失了短波光在2—3 mm范围的光照, 同样对模

组光电输出不利. 这是目前在常规的HCPV模组设计中所忽视的. 所以, 模组中电池大小和位置需要优化.

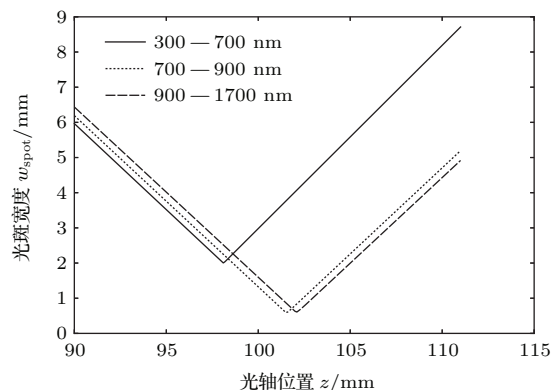


图4 菲涅耳透镜光斑宽度随光轴位置的变化(焦平面为光轴100 mm处)

Fig. 4. The variation of spot width under Fresnel lens with the change of optical axis positions.

图5为电池表面各波段光的辐射功率随电池位置和电池宽度的变化. 图中辐射功率的变化基本反映了图4中光斑宽度的变化: 电池面积越大, 电池表面辐射功率随位置的变化就会越小; 若电池面积小于某个波段的光斑面积, 该波段的光将不能全部会聚到电池上. 由图4中最小光斑宽度可得, 当电池宽度小于2 mm时, 短波段光不能全部会聚到电池表面上, 当电池宽度继续小到0.6 mm以下时, 中波段和长波段的光将不能全部会聚到电池上, 但实际中极少将电池宽度做到1 mm以下, 故实际中电池损失的光照能量主要是短波段.

由图5还可以看到, 总辐射功率的变化基本与短波段的一致, 这是由于短波段辐射功率最大(最大辐射功率约为中波和长波段之和), 且中波和长波段的变化又基本一致, 故影响总辐射功率变化的主要是短波段.

对于几何尺寸确定的聚光装置, 在标准状况下入射到聚光器的光照能量是确定的, 因而一个模组的发电性能由电池输出功率决定. 图6为电池特性参数(短路电流、最大输出功率、填充因子、电池效率)随电池在光轴上位置的变化. 其中, 图6(b)为电池宽度分别为2.0, 2.5, 3.0 mm时电池最大输出功率随光轴位置的变化. 可以看到, 功率最大的光轴位置关于设计焦平面位置(100 mm)大致对称, 而在焦平面位置附近, 功率有极小值. 不同宽度电池的功率最大点位置不同, 电池宽度越大, 功率最大点位置越远离设计焦平面, 同时功率也越大.

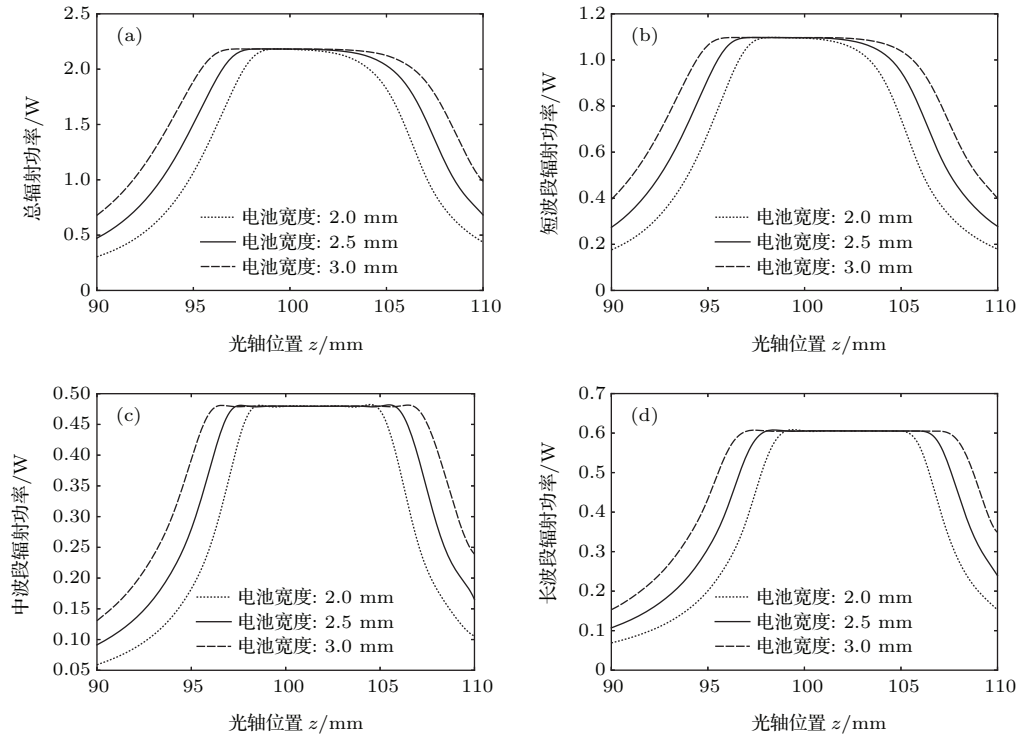


图5 三种电池宽度的电池表面辐射功率随光轴位置的变化 (a) 总辐射功率; (b) 短波段 (300—700 nm) 辐射功率; (c) 中波段 (700—900 nm) 辐射功率; (d) 长波段 (900—1700 nm) 辐射功率

Fig. 5. The variation of radiant power on cell's surface of three different width with the change of optical axis positions: (a) Total radiant power; (b) short-wave band radiant power (300–700 nm); (c) medium-wave band radiant power (700–900 nm); (d) long-wave band radiant power (700–900 nm).

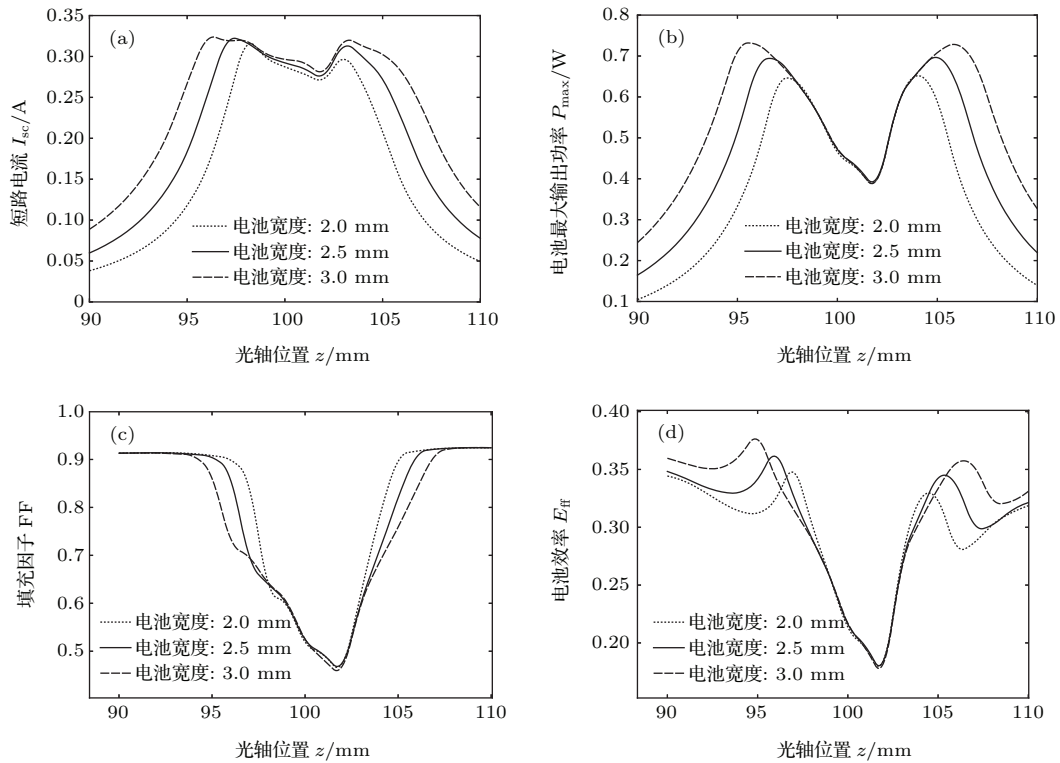


图6 电池特性参数随电池位置的变化 (a) 短路电流; (b) 最大输出功率; (c) 填充因子; (d) 电池效率

Fig. 6. The variation of cell characteristic parameters with the change of cell position: (a) Short-circuit current; (b) maximum output power; (c) fill factor; (d) cell efficiency.

3.2 光轴方向三结电池的光电性能

图 6(a) 中短路电流变化基本与图 5 中总辐射功率及短波段辐射功率变化一致, 这说明光照中影响电池短路电流的主要波段是短波段. 从图 6(b) 中可以看到电池输出功率会在设计焦平面附近有较大下降. 电池输出功率下降的原因可以从图 6(c) 中填充因子的变化中看到. 在设计焦平面附近, 光辐射功率基本不变, 但填充因子有较大下降, 从而引起电池输出功率的下降. 随电池宽度增大, 填充因子的下降幅度略微增大. 在设计焦平面附近, 三种宽度电池的填充因子变化基本一致. 电池效率随光轴位置的变化也反映了填充因子的变化, 如图 6(d) 所示. 图 6(d) 与图 6(b) 对比可以看到, 光照能量会聚最高的光轴位置, 却是填充因子下降的区域, 而电池功率达到最大时的位置是辐射功率最大区域的边缘.

表 2 和表 3 分别为根据图 5 和图 6 得到的两种尺寸电池的输出功率和效率达到极大值时的光轴位置. 两表还给出了在电池功率达最大时的总辐射功率与最大总辐射功率之比. 从表中数据可以看到, 电池功率和电池效率达到最大时的光轴位置基本一致, 但这些位置所对应的辐射功率并未达到相应电池宽度所能接收到的最大辐射功率, 而是接近最大辐射功率, 在辐射功率略微下降处. 也就是说, 电池最大输出功率在设计焦平面沿光轴方向的上面(靠近透镜) 3 mm 及下面(远离透镜) 5 mm 平面处, 比焦平面处高出 34% 以上(电池宽度为 2.0 mm 时最少, 为 34%).

对一定宽度的电池, 在电池表面辐射功率基本不变的情况下, 填充因子的下降引起了电池最大功率的下降, 而影响填充因子的一个重要因素为光照非均匀性^[2]. 对宽度为 2.5 mm 的电池, 根据图 6(b), 电池功率曲线两个极大值一个极小值的光轴位置分别为 97, 102, 105 mm. 根据图 4, 以上三个位置对应的光斑宽度及电池输出功率如表 4 所列.

从表 4 可以看到, 电池功率最大的两处(97, 105 mm), 光斑宽度与电池宽度(2.5 mm) 相当或较大, 其中短波段的光斑宽度均大于电池宽度. 在电池功率最小处, 中波段和长波段的光斑宽度都很小, 不到电池宽度的 1/3. 由此可见, 电池填充因子的下降主要原因是中波段和长波段的光照过于集中, 造成光照比较严重的非均匀性.

表 2 靠近透镜处 P_{\max} 和 η 最大值位置
Table 2. Maximum points of P_{\max} and η near lens.

电池宽度/mm	P_{\max} 最大处位置/mm	η 最大处位置/mm	$\frac{P_{\max}$ 最大处辐射功率}{辐射功率最大值} /%
2.0	98	97	96.0
2.5	97	96	96.6
3.0	96	95	97.1

表 3 远离透镜处 P_{\max} 和 η 最大值位置
Table 3. Maximum points of P_{\max} and η far from lens.

电池宽度/mm	P_{\max} 最大处位置/mm	η 最大处位置/mm	$\frac{P_{\max}$ 最大处辐射功率}{辐射功率最大值} /%
2.0	104	104	92.3
2.5	105	105	93.1
3.0	106	106	93.8

表 4 不同光轴位置处的光斑宽度及电池输出功率
Table 4. Facular width and output power in different optical axis positions.

光轴位置/mm	短波光斑宽度/mm	中波光斑宽度/mm	长波光斑宽度/mm	电池输出功率/W
97	2.5	2.8	3.0	0.68
102	4.0	0.8	0.6	0.41
105	5.6	2.2	2.0	0.69

图 7 给出了由光线跟踪得到的在以上三个光轴位置处电池表面上各波段光强倍数分布, 这里的光强倍数定义为相应位置处的光强与标准状况下该波段的光强之比. 从图 7(a) 中可以看到, 从 97—105 mm, 光强的极大值先增大后减小, 光照能量集中区域先减小后增大. 三个位置的光强分布对比可以看到, 97 和 105 mm 两个位置处的光强分布比 102 mm 处的要均匀. 图 4 中短波段光照宽度是由最短波长光决定的, 但短波段的能量分布并不均匀, 而是较集中在 500 nm 附近, 从而造成尽管 102 mm 处的光斑宽度很大, 但光照能量依然更集中于电池表面.

图 7(b) 和图 7(c) 给出了在三个光轴位置处电池表面上中波段和长波段的光强倍数沿电池宽度方向的分布. 由两图可以看到, 中波段和长波段的光强分布在 102 mm 处有很大的非均匀性, 在 97 mm 和 105 mm 处非均匀程度相对较小.

由以上三个波段的光强分布可以得出, 在光照位置 102 mm 处, 三个波段的光强分布的非均匀性都增大了, 其中中波段和长波段的非均匀性最大,

从而造成电池填充因子的下降, 进而导致电池输出功率下降.

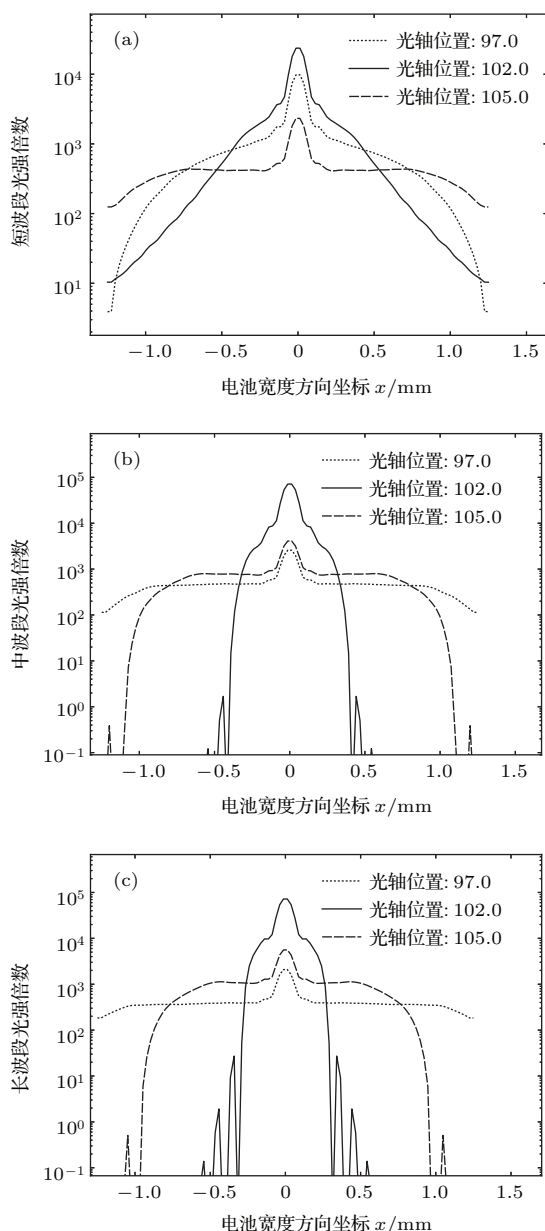


图7 电池宽度为 2.5 mm 时不同光轴位置处电池表面光强分布 (a) 短波段; (b) 中波段; (c) 长波段

Fig. 7. Light intensity distribution on cell surface of different optical axis positions when the width of the cell is 2.5 mm: (a) Short-wave band; (b) medium-wave band; (c) long-wave band.

光轴位置 102 mm 处, 三个波段的辐射功率都达到最大, 但由于光照的非均匀性, 反而造成电池输出功率和效率的下降. 电池输出功率和效率能否达到最大, 需要在光照辐射功率和光强分布均匀程度之间进行权衡. 由以上分析可以得出, 电池功率和效率的最大处位于光照辐射功率略微下降、光强分布较均匀的光轴位置.

4 实验研究

4.1 实验平台组成

实验系统主要分为跟踪系统、固定及调节系统、测试系统、数据采集系统 4 个部分.

图 8 所示为搭建的实验系统图. 跟踪系统是一个太阳能双轴全自动跟踪器, 其主要作用是由传感器追踪阳光的位置, 转换成电信号驱动传动装置进行相应的追踪, 使所需的入射面始终与阳光保持垂直.

固定与调节系统主要分为两个部分, 一个是固定系统, 一个是调节系统. 固定系统的作用是把调节系统以及测试系统等所有的部件固定在传动装置上, 使其能够跟着传动装置跟踪阳光, 而通过设计的固定系统能够方便地更换电池以及透镜, 方便不同情况的对比测试.



图8 高倍聚光光伏电池室外测试系统

Fig. 8. Outdoor testing system of HCPV solar cells.

调节系统是这个实验系统的核心, 也是功能实现的主要部件. 通过调节系统, 首先实现了电池与透镜中心点的对中调节, 保证电池与透镜的中心始终是对齐的, 其次调节系统实现了电池与透镜间在光轴上的相对距离的自由调节.

测试系统主要由两个部分构成. 首先是测试采用的三结电池, 尺寸为 5 mm × 5 mm. 另一个部分则是采用菲涅耳透镜. 所用菲涅耳透镜的尺寸有两种, 分别为直径 110 mm, 焦距 100 mm, 以及直径 200 mm, 焦距 220 mm, 透镜的材料为 PMMA.

4.2 实验测试及结果分析

实验于2015年11月3日在广州市中山大学太阳能研究所顶楼进行, 数据采集选取11月3日的11:30—12:00. 此时间段内环境温度20 °C上下, 波动幅度不超过1 °C, 环境DNI 700—800 W/m².

在DNI基本稳定的情况下进行实验, 改变菲涅耳透镜与电池之间在光轴上的相对距离, 使其距离由近到远. 调节的范围为10 mm, 我们发现当调节电池与菲涅耳透镜相对距离 D 时, 照射在电池上的

光斑颜色慢慢发生改变, 如图9所示, 可以看到当 D 从96 mm增加到103 mm时光斑的颜色逐渐由蓝色变为蓝紫色慢慢转变为橙色. 这个现象可以看出, 在光轴上的光斑分布是不同的, 导致了光斑反射出来的颜色呈现不同的变化. 正如之前模拟所得, 由于光的波长不同, 在菲涅耳透镜的折射率不同, 因此通过菲涅耳透镜后在光轴上的光斑分布必然不同, 又因为三结电池是由三个吸收不同波长的光的子电池组成, 所以这样的现象必然会对三结电池的发电性能产生影响.

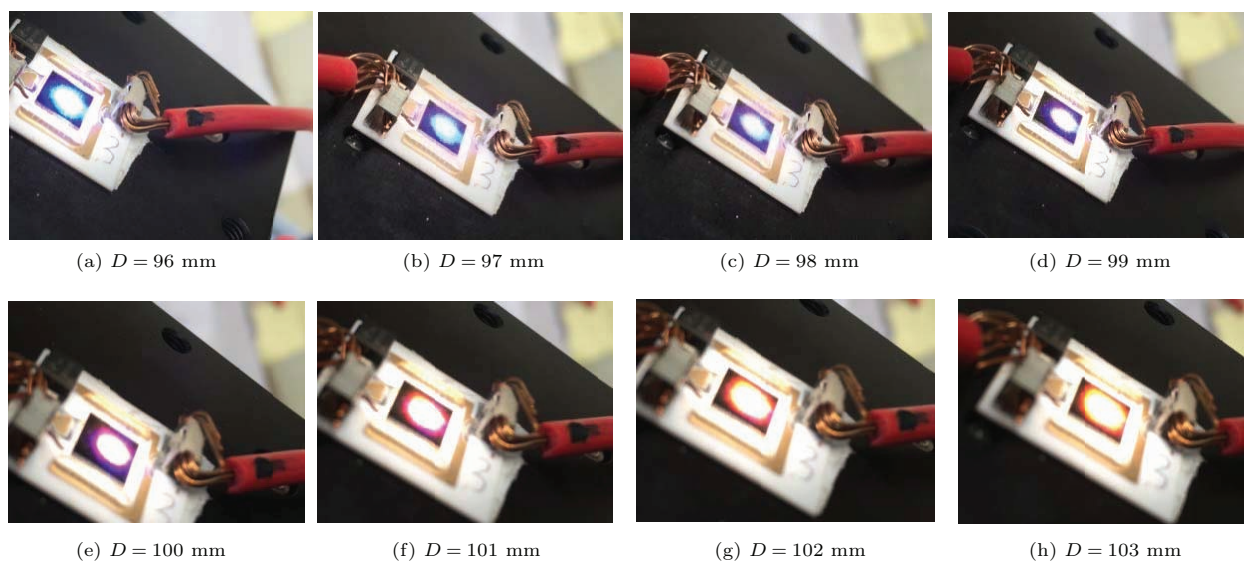


图9 (网刊彩色) 菲涅耳透镜聚光下电池表面光斑颜色随电池与透镜距离的变化

Fig. 9. (color online) The variation of light spot color on the cell surface under Fresnel lens with the change of the distance between cell and lens.

同时, 我们对此过程中的电数据进行采集. 透镜与电池距离每改变0.5 mm记录一组数据. 结果如图10所示, 横坐标为电池与透镜之间的距离, 纵坐标为电流/DNI(A·m²/W), 或者电功率/DNI(m²).

图10是使用的菲涅耳透镜焦距为100 mm时所得到的其中三次的电流数据, 我们可以发现, 尽管略微有些差异, 但是几次实验在焦平面100 mm附近的电流都有所下降. 图11为在实验时间段内进行的几次实验电流的平均值随距离变化的图像, 我们可以看到, 平均电流在100 mm处有明显的下降, 存在一个极小值, 而在焦平面的两边分别有一个极大值存在.

图12为透镜焦距为220 mm时几次实验的算术平均得到的结果. 这个图里可以更为清楚地看到在焦平面220 mm处, 电流以及功率有明显的下降,

功率的最大值点出现在焦平面后3.5 mm处. 极大值处比极小值处电功率提升了有29%.

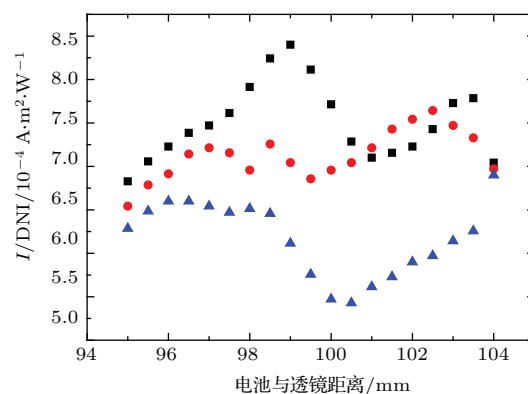


图10 使用焦距为100 mm的菲涅耳透镜时, 其中三次重复实验短路电流随电池与透镜距离的变化

Fig. 10. The variation of short circuit current in three experiments with the change of the distance between cell and the Fresnel lens whose focal length is 100 mm.

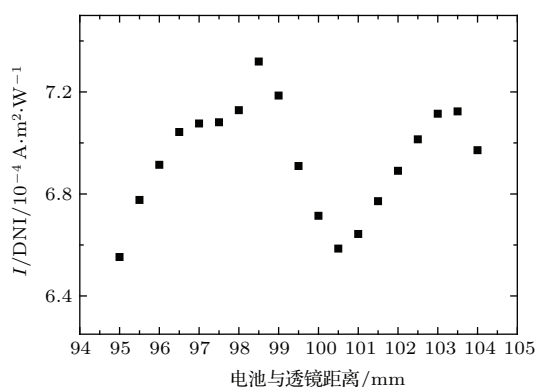


图 11 使用焦距 100 mm 的非涅耳透镜时, 实验时间段内的平均短路电流随电池与透镜距离的变化

Fig. 11. The variation of average short circuit current over the experimental period with the change of the distance between cell and Fresnel lens whose focal length is 100 mm.

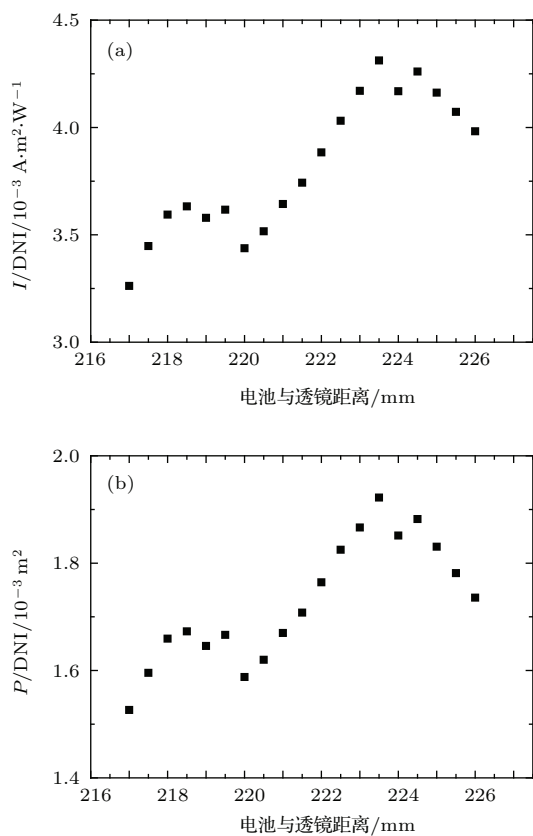


图 12 使用焦距为 220 mm 的非涅耳透镜时, 实验时间段内电池特性参数随电池与透镜距离的变化 (a) 电功率; (b) 短路电流

Fig. 12. The variation of average cell characteristic parameters over experimental period with the change of the distance between cell and Fresnel lens whose focal length is 200 mm: (a) Power; (b) short circuit current.

从以上几个实验的数据图中分析可以看到, 在改变电池与透镜在光轴的相对距离的时候, 在靠近菲涅耳透镜的设计焦平面的位置时电池的发电性

能确实会有一个小幅度的下降, 存在一个极小值点. 实验由于室外条件下有很多不确定因素的干扰, 结果与模拟相比会有更多不确定因素. 在这种情况下得出的结果显示, 用 200 mm 的透镜时在焦平面两侧功率比焦平面位置的功率能够提升 29% 左右, 一定程度上验证了模拟得出的结果, 由于在焦平面出光辐射功率的增大导致了非均匀性达到最大, 从而导致这个位置的发电性能反而下降.

5 结 论

本文计算了不同大小的三结太阳能电池处于菲涅耳透镜的不同光轴位置下的电池性能, 同时又搭建实验平台通过实验观察不同光轴位置下的电池性能表现与计算结果进行对照. 结果表明, 电池输出功率最大的位置并不处于透镜焦平面附近, 而是位于光照辐射功率略微下降处. 从对比不同光轴位置处的光照分布可以得出, 中波段和长波段的光照非均匀性的增加是电池性能在透镜焦平面附近下降的主要原因, 电池越大, 这种非均匀性影响的光轴位置范围也越大. 在光轴上的透镜焦平面两旁的光照辐射功率略微下降处, 电池的输出功率达到最大, 对于这两个位置, 电池表面的光照辐射功率和非均匀性达到一种平衡, 使得电池输出功率到达极大值, 该位置也是模组到达最大效率时的电池最佳安装位置.

参考文献

- [1] Green M A, Emery K, Hishikawa Y, Warta W, Dunlop E D 2015 *Prog. Photovoltaics* **23** 1
- [2] Baig H, Heasman K C, Mallick T K 2012 *Renew. Sust. Energy Rev.* **16** 5890
- [3] Helmers H, Schachtner M, Bett A W 2013 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **116** 144
- [4] Zhang W, Chen C, Jia R, Sun Y, Xing Z, Jin Z, Liu X Y, Liu X W 2015 *Chin. Phys. B* **24** 108801
- [5] Eduardo F F, Florencia A 2015 *Energy Convers. Manage.* **103** 1031
- [6] Chen F X, Wang L S, Xu W Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 045202
- [7] Zubi G, Bernal-Agustín J L, Fracastoro G 2009 *Renew. Sust. Energy Rev.* **13** 2645
- [8] Chen N F, Bai Y M 2007 *Physics* **36** 862 (in Chinese) [陈诺夫, 白一鸣 2007 物理 **36** 862]
- [9] Yang G H, Wei M, Chen B Z, Dai M C, Guo L M, Wang Z Y 2013 *J. Appl. Opt.* **34** 898 (in Chinese) [杨光辉, 卫明, 陈丙振, 代明崇, 郭丽敏, 王智勇 2013 应用光学 **34** 898]

- [10] Languy F, Fleury K, Lenaerts C, Loicq J, Regaert D, Thibert T, Habraken S 2011 *Opt. Express* **19** A280
- [11] Marc S, Armin B, Alexander D, Frank D, Tobias D, Matt M, Thorsten H, Gerald S, Maike W, Andreas W B 2015 *Prog. Photovoltaics* **23** 1323
- [12] Steiner M, Philipps S P, Hermle M, Bett A W, Dimroth F 2011 *Prog. Photovoltaics* **19** 73
- [13] Steiner M, Guter W, Peharz G, Philipps S P, Dimroth F, Bett A W 2012 *Prog. Photovoltaics* **20** 274
- [14] Segev G, Mittelman G, Kribus A 2012 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **98** 57
- [15] Rodrigo P, Fernández E F, Almonacid F, Pérez-Higueras P J 2013 *Renew. Sust. Energy Rev.* **26** 752
- [16] Yi S G, Zhang W H, Ai B, Song J W, Shen H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 028801
- [17] Jia X J, Ai B, Xu X X, Yang J M, Deng Y J, Shen H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 068801 (in Chinese) [贾晓洁, 艾斌, 许欣翔, 杨江海, 邓幼俊, 沈辉 2014 物理学报 **63** 068801]
- [18] Liang Q B, Shu B F, Sun L J, Zhang Q Z, Chen M B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 168801 (in Chinese) [梁齐兵, 舒碧芬, 孙丽娟, 张奇淄, 陈明彪 2014 物理学报 **63** 168801]
- [19] Ota Y, Nishioka K 2012 *Sol. Energy* **86** 476

Performance and optimization research of triple-junction solar cell along the optical axis direction on the HCPV module*

Lian Rong-Hai Liang Qi-Bing Shu Bi-Fen[†] Fan Chou Wu Xiao-Long Guo Yin
Wang Jing Yang Qing-Chuan

(Institute for Solar Energy System, School of Engineering, Sun Yet-Sen University, Guangzhou 510006, China)

(Received 28 March 2016; revised manuscript received 10 April 2016)

Abstract

High concentrating photovoltaic (HCPV) technology plays a more and more important role in solar power generation due to its extremely high efficiency. However, the efficiency of the HCPV module can be reduced by many factors. Especially, there are not enough researches and knowledge on the light intensity distribution and non-uniform illumination of different wavelengths of light concentrated by Fresnel lens. It is generally considered that the maximum power of multi-junction solar cell is achieved when the cell is placed on the focal plane of Fresnel lens. But it is proved to be incorrect by our research. When light beams of different wavelengths go through the Fresnel lens, their light spot distributions on the optical axis are not the same as those when they have different refractive indexes in Fresnel lens. At the same time, the triple-junction solar cell consists of three sub-cells which absorb light beams of different wavelengths respectively. Therefore, the performance of triple-junction cells would be influenced by the light distribution along the optical axis, this is exactly what we want to study in this work. The method of simulating the light tracing is used to calculate and analyze the light intensity distribution and non-uniform characteristics of different wavelengths of light concentrated by Fresnel lens. Combined with them from the circuit network model of a triple-junction solar cell, the electrical performances of triple-junction solar cell at different positions along the optical axis are studied. It is found from the simulation that the performance of cell does not reach the best state when cell is placed on the focal plane. The power of cell on the focal plane reaches only 0.41 W while the maximum point arrives at 0.69 W. The high non-uniformity of light on cell surface when cell is placed on the focal plane causes the decline of power. And an outdoor HCPV testing system with the ability to change the distance between Fresnel lens and the cell is conducted. The experimental results and the simulation results match well, therefore our simulation approach is verified. It shows that the module achieves the maximum power on either side of the focal plane, and the output power can increase more than 20% after optimization. It is a result after equilibrium between light intensity and uniformity on cell surface.

Keywords: concentrating photovoltaic, Fresnel lens, triple-junction cell, non-uniform illumination

PACS: 88.40.fc, 88.40.fr, 88.40.jp, 88.40.hj

DOI: 10.7498/aps.65.148801

* Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 2014A030311050) and the Major Science and Technology Special Project of Guangdong Province, China (Grant No. 2013A011402005).

[†] Corresponding author. E-mail: shubifen@163.com