

基于棱镜二次聚光的高倍聚光模组聚光特性与三结电池光谱响应匹配与优化

郭银 舒碧芬 汪婧 杨晴川 江景祥 黄妍 周正龙

Concentrating characteristics of Fresnel lens with prism secondary concentrator and optimization of high concentrating photovoltaic module with triple-junction cell

Guo Yin Shu Bi-Fen Wang Jing Yang Qing-Chuan Jiang Jing-Xiang Huang Yan Zhou Zheng-Long

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 108801 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172778

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172778>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I10>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[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](#)

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

物理学报.2016, 65(14): 148801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.148801>

[Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> 晶界性质与光伏效应的第一性原理研究](#)

First-principles studies on the properties of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> 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>

# 基于棱镜二次聚光的高倍聚光模组聚光特性与三结电池光谱响应匹配与优化\*

郭银 舒碧芬<sup>†</sup> 汪婧 杨晴川 江景祥 黄妍 周正龙

(中山大学, 太阳能系统研究所, 广东省光伏技术重点实验室, 广州 510006)

(2017年12月31日收到; 2018年3月7日收到修改稿)

目前 III-V 多结高倍聚光 (HCPV) 太阳能电池实验室效率记录已高达 46%, 而相对应的模组效率与之相差仍较大, 其中由于模组中聚光非理想性引起的损失就高达 20%. 本文通过建立光学模型和非均匀光照的三结电池电路网络模型, 以 III-V 族三结电池为例, 研究了菲涅耳透镜一次聚光、棱镜二次聚光的 HCPV 模组的聚光特性和光电特性. 结果发现: 由于光线非平行入射和菲涅耳透镜的色散现象, 使得沿光轴方向短、中、长波段聚光发散及聚光不均匀, 从而造成了三结电池的上、中、下各子电池光谱响应失配损失, 模组光电转换性能下降; 进一步, 通过采用棱镜二次聚光, 能较好地改善聚光和温度均匀性; 通过对光轴方向上短、中、长波段的聚光特性与三结电池光谱响应匹配优化, 使得模组输出功率提高 10% 以上. 模拟结果已得到实验验证.

**关键词:** 高倍聚光光伏模组, III-V 三结电池, 二次聚光棱镜, 非均匀性

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

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172778

## 1 引言

在高倍聚光 (HCPV) 光伏模组中, 目前采用的主要是以 III-V 族半导体材料为基础的多结太阳能电池. 该种电池的基本设计原理是利用不同禁带宽度的半导体材料对太阳光的不同波段分别进行吸收, 并利用 p-n 结的光伏效应, 将光能转换为电能<sup>[1-4]</sup>, III-V 族多结高倍聚光太阳能电池实验室最高效率记录已高达 46%<sup>[5]</sup>, 而模组效率只达到 38.9%<sup>[6]</sup>. 典型的 III-V 族三结电池的光谱响应如图 1 所示.

使光线会聚的方式有多种, 按会聚的光学方式可分为反射式和透射式. 反射式聚光一般是利用反射镜将光线反射聚集在一起. 槽式聚光为线聚光系统, 通常聚光倍数较低 (20 倍左右). 而采用点聚光方式的碟式聚光系统可以获得更高的聚光倍数. 目前采用不同的反射材料制成的反射镜已经应用在

聚光光伏系统中. 而透射式聚光系统则通常是采用透镜使光线透射后进行折射, 最终聚集在一起. 由于聚光装置的非理想性, 光照在通过聚光装置并会聚到电池表面的过程中会有较大的光能损失, 并且电池表面的光照分布具有较大的非均匀性<sup>[7]</sup>,

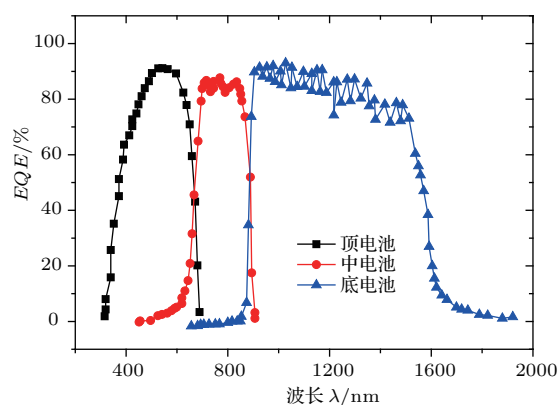


图 1 III-V 族三结电池的光谱响应

Fig. 1. Spectral response of III-V triple-junction cell.

\* 国家自然科学基金 (U1707603) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: shubifen@163.com

几何聚光倍数越高,光照非均匀性对电池的影响越显著,这种非均匀光照也加强了温度分布的非均匀性,导致电池的工作效率降低,而降低的电池效率也会反过来使得电池温度升高<sup>[8]</sup>.这种光照非均匀性与温度非均匀性的耦合作用,使得模组效率相比电池效率要低很多,这也使得在聚光(CPV)光伏组件的研究中,对聚光光学系统及电池在非均匀光照下的性能优化具有重要意义.

目前,采用菲涅耳透镜为聚光器的高倍点聚光光伏模组由于具有容易模块化生产的优势而成为研究热点,也是目前产业化市场上的主流产品.本文就是以此为研究对象.本团队以往对光的色散问题的研究表明:由于色散现象,通过透镜聚光后不同波段的光沿光轴方向上发生分散,降低了三结电池的光谱响应<sup>[9]</sup>.李欣等<sup>[10]</sup>研究表明,减小电池尺寸确实有利于减小色散效应对电池性能的影响.本文进一步的工作表明,光线非平行入射现象也是不可以忽略的,光线非平行入射使得通过透镜聚光后的光斑偏离了光轴,降低了一定尺寸上的多结电池的接收光强,且恶化了光强分布的均匀性.综合以上两方面的结果,色散及非平行入射光使得电池平面及聚光光轴方向空间维度上的短、中、长波段聚光发散及聚光不均匀,从而造成了三结电池的上、中、下三结子电池光谱响应失配损失,模组光电转换效率下降.本文通过建立光学模型和非均匀光照的三维电池电路网络模型,以III-V族三结电池为例,研究了菲涅耳透镜一次聚光、棱镜二次聚光的HCPV模组的聚光特性和光电特性,优化模组结构,减少光线非平行入射和色散引起的负面影响.由于采用光线跟踪可以得到接近实际聚光效果的光照分布,而电池电路网络模型又可较为精确地计算电池在一定光照分布下的电池特性<sup>[11-17]</sup>,故将两者结合可以较为准确地计算CPV模组的实际发电性能<sup>[18-21]</sup>.

## 2 理论模型

### 2.1 光学模型

#### 2.1.1 菲涅耳一次聚光

菲涅耳透镜通常有两种材料制成,一种为玻璃,一种为PMMA,本文选用PMMA作为研究对象.模拟中采用的菲涅耳透镜为等环宽平板型,截面示意图见图2.

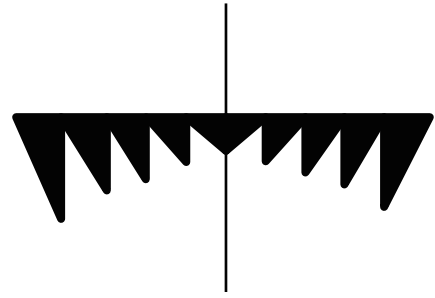


图2 菲涅耳透镜截面示意图

Fig. 2. Section diagram of Fresnel lens.

#### 2.1.2 棱镜二次聚光模型

二次聚光器应使进入的光线全部出射到电池表面上,才能保证最大的光线能量集中.对菲涅耳透镜而言,最外围环的环高最大,环倾斜角最大,因此对光线的折射造成的偏转角也最大.

棱镜上表面的宽度应使从菲涅耳透镜边缘的最短和最长波长的光都能入射,图3中 $f_1$ ,  $f_2$ 分别为透镜边缘最短和最长波长的光与光轴的焦点, $r$ 为透镜半宽, $r_{top}$ 为棱镜上表面一半宽度.最短波长光在位置 $z$ 处的光照宽度 $r_1$ 为

$$r_1 = \left| \frac{z - f_1}{f_1} \right| r. \quad (1)$$

同理,最长波长光在位置 $z$ 处的光照宽度 $r_2$ 为

$$r_2 = \left| \frac{z - f_2}{f_2} \right| r. \quad (2)$$

棱镜上表面宽度 $r_{top}$ 应不小于 $r_1$ 和 $r_2$ 中的最大值,即

$$\begin{aligned} r_{top} &\geq \max\{r_1, r_2\} \\ &= \max \left\{ \left| \frac{z - f_1}{f_1} \right| r, \left| \frac{z - f_2}{f_2} \right| r \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

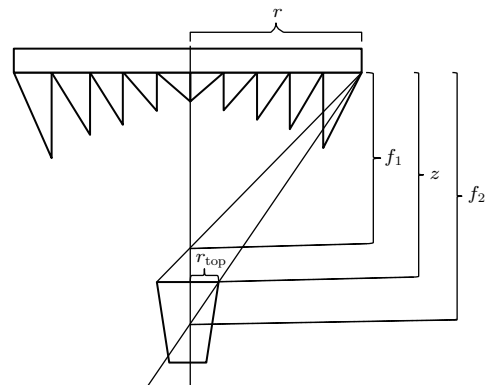


图3 棱镜式二次聚光装置上表面光路示意图

Fig. 3. Light path diagram of prism type secondary condensing device.

二级聚光棱镜应能保证从菲涅耳透镜处会聚的光线基本都能入射到棱镜上表面, 棱镜上表面宽度与棱镜位置和电池宽度有关. 棱镜的下表面宽度为光照出口宽度, 与电池宽度一致. 为有比较好的均匀光照的效果, 实际中棱镜的高度一般都超过出口宽度的两倍, 这里取棱镜的最小高度为电池宽度的两倍. 图4为二次聚光棱镜光线跟踪模拟示意图.



图4 二次聚光棱镜光线跟踪模拟示意图  
Fig. 4. Light tracing simulation diagram under secondary condensing prism.

## 2.2 非平行光入射

对某一波长的单色光, 当光线与光轴不平行时, 光线并不会聚于透镜焦点处, 而是会聚于透过焦点并垂直于光轴的平面上的某一点, 该平面称为焦平面, 如图5所示, 其中 $O$ 为入射面中心,  $F$ 为焦点位置. 当光源的出射光发散时, 不同方向的光线会聚于焦平面上不同的点, 这样会使光照能量集中于焦点附近的情况得到一定程度的缓解, 光源的发散角越大, 光照能量越分散.

500 nm 单色光在不同发散角下聚焦示意图如图6所示. 发散角为 $0^\circ$ 表示出射光为平行光轴的平行光. 对平行光而言, 光线汇聚于焦点, 若电池位于焦点, 则电池中心位置将有极大的光强. 而当光线具有一定发散角时, 经过透镜的光线将不能全部聚焦在焦点处, 发散角越大焦点附近的光点越分散, 从而光斑也越大. 光斑大小对光源发散角比较敏感, 发散角即便改变 $1^\circ$ 也会对光斑大小造成十分明显的影响.

AM1.5d 光谱在不同发散角下经过透镜聚光后在焦点处的光强倍数分布如图7所示. 平行光下光照十分集中于电池中心, 当光源有发散角并且发散角增大时, 光照的集中程度有所减弱, 电池中心的光强明显降低, 这说明光线发散会明显减弱电池表面的光照非均匀性, 因光照的非均匀性会对电池性能有较大影响, 故光源出射光的发散角也会对电池性能有较大影响.

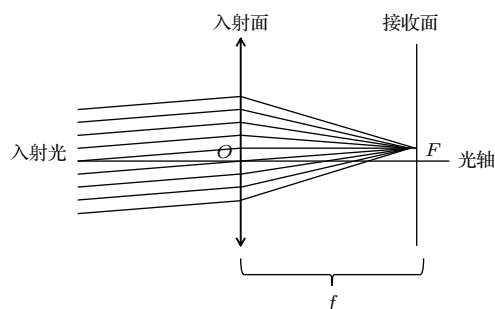


图5 与光轴不平行的单色光聚焦示意图  
Fig. 5. The focusing schematic diagram of non parallel incident monochromatic light.

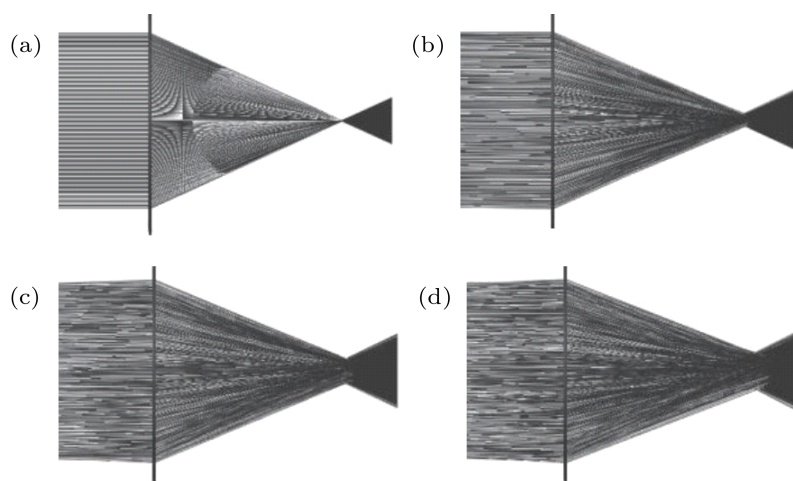


图6 500 nm 单色光在不同发散角下聚焦示意图 (a) 发散角 $0^\circ$ ; (b) 发散角 $1^\circ$ ; (c) 发散角 $2^\circ$ ; (d) 发散角 $3^\circ$

Fig. 6. The focusing schematic diagram of monochromatic light (500 nm) under the different divergence angle: (a) Divergence angle  $0^\circ$ ; (b) divergence angle  $1^\circ$ ; (c) divergence angle  $2^\circ$ ; (d) divergence angle  $3^\circ$ .

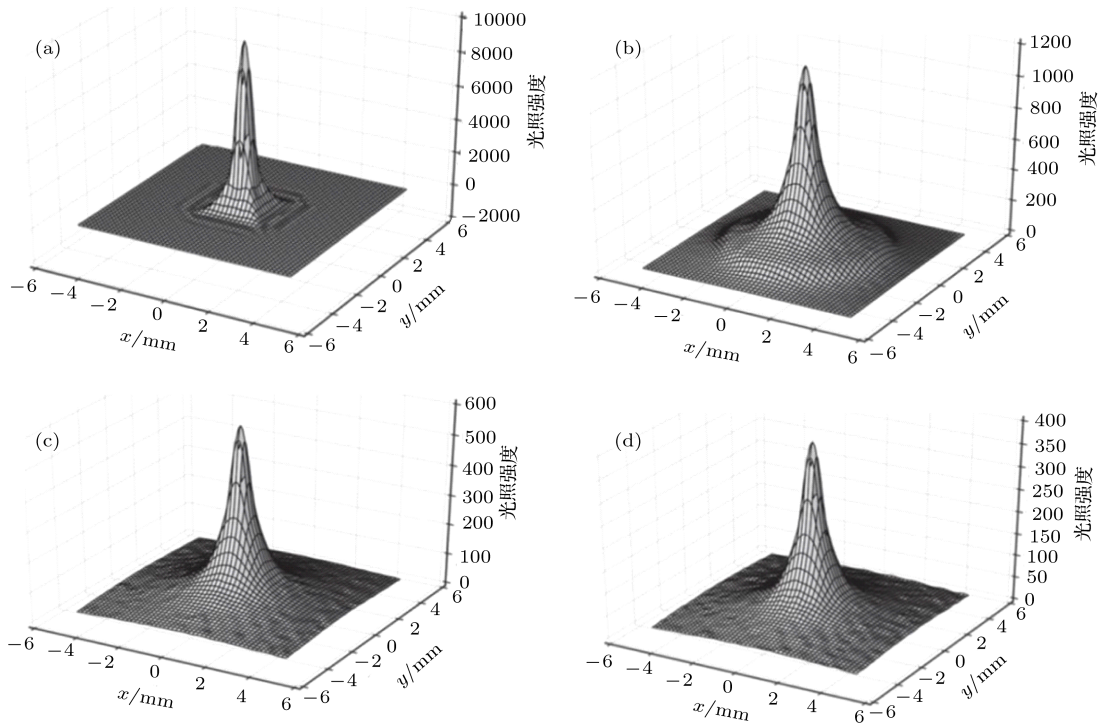


图7 AM1.5 d 光谱在不同发散角下经过透镜聚光后在焦点处的光强倍数分布 (a) 发散角 0°; (b) 发散角 1°; (c) 发散角 2°; (d) 发散角 3°

Fig. 7. The light intensity distribution of the focus under different divergence angle after lens focusing (AM1.5d spectra): (a) Divergence angle 0°; (b) divergence angle 1°; (c) divergence angle 2°; (d) divergence angle 3°.

### 2.3 非均匀聚光条件下三维三结电池等效电路模型

三结电池由三个 p-n 结构成, 上中下三结的材料分为 Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P, Ga<sub>0.99</sub>In<sub>0.01</sub>As, Ge, 相邻的 p-n 之间由隧道二极管连接. 三结电池的三个结相当

于三个太阳子电池串联, 以二极管模型来代替这三个子电池, 每个 p-n 结用独立的电流源和二极管来代替, 而隧道二极管由于精度要求较低, 可用电阻代替. 由于在实际电池中并联电阻往往很大, 因此在三结电池的等效电路中一般忽略并联电阻.

三结电池的电流电压关系为

$$\begin{cases} I = I_{Lt} - I_{0t1} \left( \exp \frac{qV_t}{kT} - 1 \right) - I_{0t2} \left( \exp \frac{qV_t}{2kT} - 1 \right), \\ I = I_{Lm} - I_{0m1} \left( \exp \frac{qV_m}{kT} - 1 \right) - I_{0m2} \left( \exp \frac{qV_m}{2kT} - 1 \right), \\ I = I_{Lb} - I_{0b1} \left( \exp \frac{qV_b}{kT} - 1 \right) - I_{0b2} \left( \exp \frac{qV_b}{2kT} - 1 \right), \\ V + I(R_s + R_b + R_{tt} + R_{tb}) = V_t + V_m + V_b, \end{cases} \quad (4)$$

式中  $I_{0t1}$ ,  $I_{0t2}$ ,  $I_{0m1}$ ,  $I_{0m2}$ ,  $I_{0b1}$ ,  $I_{0b2}$  分别代表每个 p-n 结二极管的反向饱和电流;  $V_t$ ,  $V_m$ ,  $V_b$  分别代表各层二极管两端电压;  $I_{Lt}$ ,  $I_{Lm}$ ,  $I_{Lb}$  分别代表三个结的光生电流;  $R_s$ ,  $R_b$ ,  $R_{tt}$ ,  $R_{tb}$  为串联电阻.

上述电路等效模型是针对在聚光均匀的情况下对于电池电特性的求解. 然而在实际中, 聚光往往是不均匀的. 当聚光不均匀时, 需要对电池表面

进行划分, 采用不同的电路元件表征不同位置的光照情况. 原来的模型每个子电池由两个二极管和一个电流源并联而成, 而改进后的模型把每个部分拆分成更多的子部分, 以对应电池表面的不同位置, 更加精确且适用. 每个小部分的结构与之前相同, 都是由两个二极管以及一个电流源构成, 这样使得整体精度提高. 而每个子部分的电流源大小,

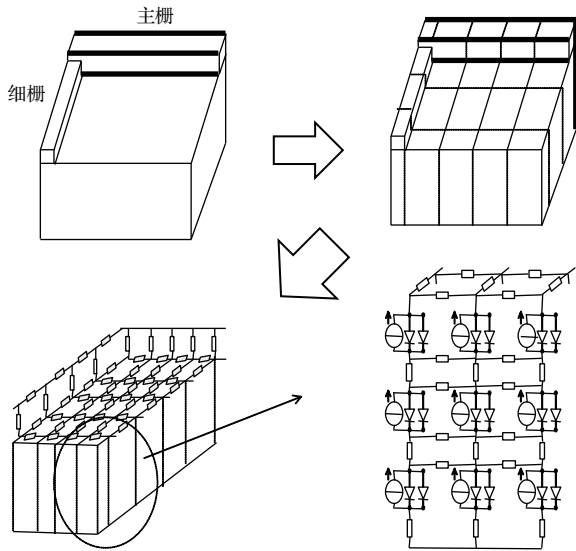


图8 三结太阳能电池电路网络模型构造过程示意图  
Fig. 8. Circuit network model construction process diagram of triple-junction solar cell.

则由照射在这个位置的光强的大小所决定, 通过电流大小的不同来表征电池表面光强分布的不同. 因

此这个模型适用于非均匀光照. 三结太阳能电池电路网络模型构造过程示意图如图8所示.

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 聚光特性

图9为无二次聚光时菲涅耳透镜聚光下不同光轴位置处5 mm宽度电池表面各波段光强倍数分布. 由图9(a)可以看到, 在透镜焦点附近, 光强分布近似为高斯分布, 而在电池功率最大的位置, 光强分布趋于平缓, 只是在电池中心部分有较大光强. 图9(b)给出了在三个光轴位置处电池表面短波段光强倍数分布. 从图中可以看到, 从-9—13 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, -9 mm和13 mm两个位置处的光强分布比焦点处的要均匀.

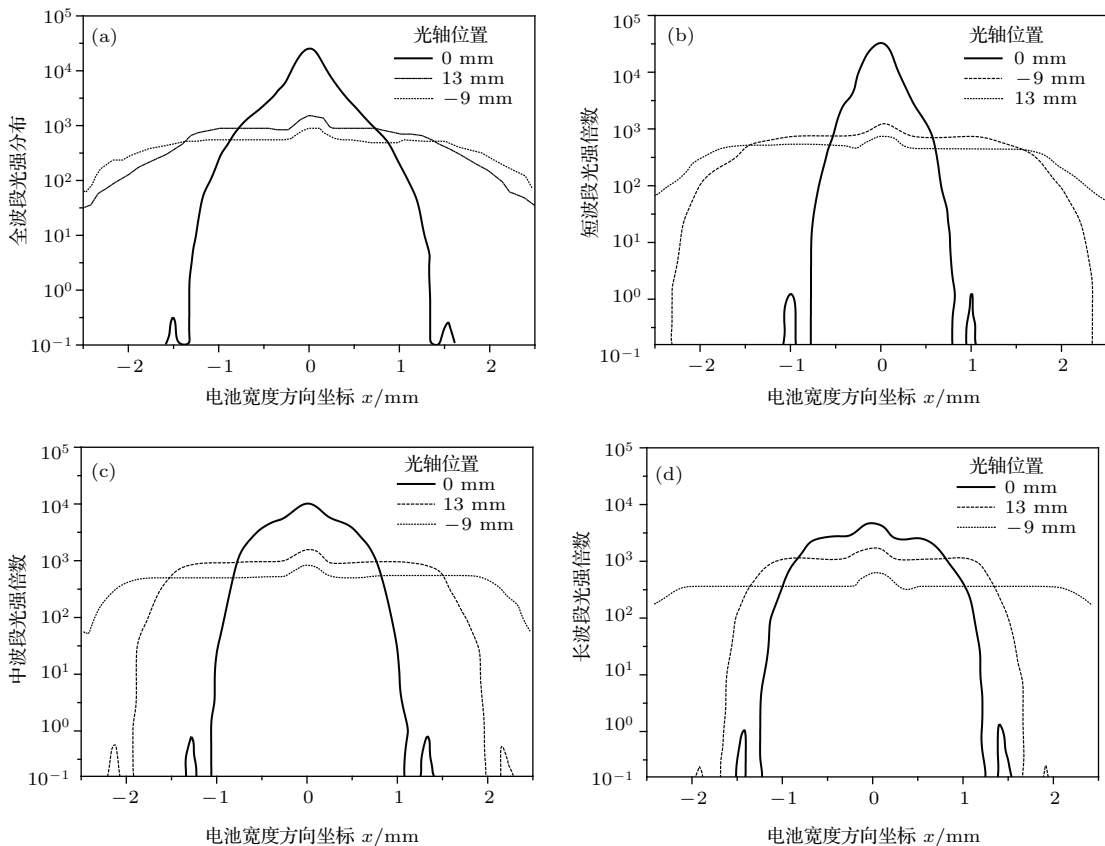


图9 无二次聚光时菲涅耳透镜聚光下不同光轴位置处电池表面各波段光强倍数分布 (电池宽度5 mm) (a) 全波段 (300—1700 nm); (b) 短波段 (300—700 nm); (c) 中波段 (700—900 nm); (d) 长波段 (900—1700 nm)

Fig. 9. Intensity distribution on the cell surface of different optical axis positions without secondary condenser (cell width is 5 mm): (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 (900–1700 nm).

表 1 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, 从而造成尽管焦点处的光照宽度很大, 但光照能量依然更集中于电池中心. 图 9(c) 和图 9(d) 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, 可以看出, 中波段和长波段的光强分布在焦点处有很大的非均匀性, 在 -9 mm 和 13 mm 处非均匀程度较小.

由以上三个波段的光强分布可以得出, 在透镜焦点处, 尽管该位置处的辐射功率最大, 但三个波段的光强分布的非均匀性都增大了.

图 10 为采用棱镜二次聚光后光照在宽度为 5 mm 的电池表面上的光强倍数分布. 对比图 9 结果可知, 采用二次聚光棱镜后, 最大辐射功率的光轴区域整体向远离透镜方向偏移, 两者沿光轴的分布形态相差不大. 从光强分布随位置的变化来看, 各波段光照集中区域在二次聚光下略微增大, 但未

充分覆盖电池表面, 依然存在色散引起的短、中、长波段聚光分散现象. 但是, 二次聚光棱镜明显提高了聚光的均匀性. 这个结果得到后续实验的验证.

表 1 不同光轴位置处的光斑宽度  
Table 1. Spot width of different optical axis positions.

相对光轴位置/mm	短波光斑宽度/mm	中波光斑宽度/mm	长波光斑宽度/mm
-9	4.8	5.3	5.8
0	5.5	2.2	2.8
13	10.2	3.7	3.2

与此同时, 电池面积越大, 可以接收的光照区域越大, 会有更多的光可以覆盖电池表面. 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. 以短波段为例, 计算得出短波段最小光斑宽度为 3.7 mm, 当电池宽度小于 3.7 mm 时, 短波段光不能全部会聚到电池表面上.

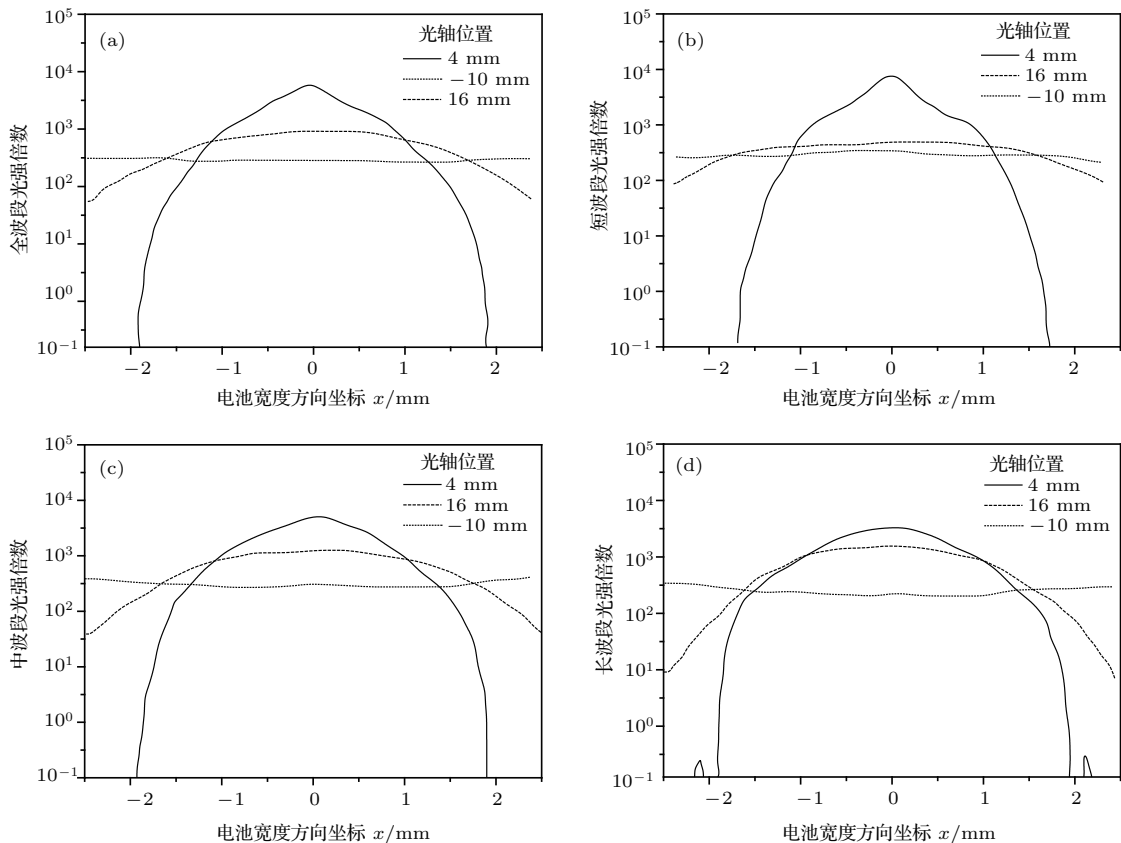


图 10 二次聚光条件下不同光轴位置处电池表面各波段光强倍数分布 (电池宽度 5 mm) (a) 全波段 (300—1700 nm); (b) 短波段 (300—700 nm); (c) 中波段 (700—900 nm); (d) 长波段 (900—1700 nm)  
Fig. 10. Intensity distribution on the cell surface of different optical axis positions (cell width is 5 mm): (a) Total radiant power; (b) short-wave band radiant power (300—700 nm); (c) medium-wave band radiant power (700—900 nm); (d) long-wave band radiant power (900—1700 nm).

### 3.2 光电特性分析与结果优化

这里以砷化镓三结太阳电池为例。三结电池有顶电池、中电池和底电池三个子电池构成,三个子电池主要光谱响应波段分别350—680, 650—900和850—1700 nm,见表2.

表2 砷化镓三结太阳电池光谱响应波段  
Table 2. Spectral response spectrum of triplejunction solar cell.

	顶电池/nm	中电池/nm	底电池/nm
主要光谱响应波段	350—680	650—900	850—1700

实际中的太阳光可以看成平行光,然而由于灰尘和透镜工艺限制等因素,光线在经过透镜的整个光路过程中很难不发生额外的发散,并且在实际的聚光太阳电池测试中,短路电流一般不会超出同聚光倍数成正比的线性范围,故而在本文的模拟计算

中,取光源发散角为 $0.2^\circ$ 时的计算结果应更接近实际情况.

结合二次聚光特性分析结果,利用三维三结电池等效电路模型,对理想光照(发散角 $0^\circ$ )和实际光照(发散角 $0.2^\circ$ )下三结太阳电池的光电特性进行模拟分析.

图11为非二次聚光下电池特性参数随光轴位置的变化情况.光源的发散情况会明显影响菲涅耳透镜的聚光效果和电池性能.由于短路电流的大小主要和电池表面的光照辐射功率有关,故图中短路电流的变化大体反映了电池表面辐射功率的变化.发散角越小短路电流越大,这是因为当光源的出射光线存在明显发散时,透镜的聚光效果下降,从而会聚到电池表面的光照能量不够集中,造成电池短路电流下降.当光线平行性较好时,短路电流在透镜焦点附近有较大下降,光线越平行,这种下降越显著.

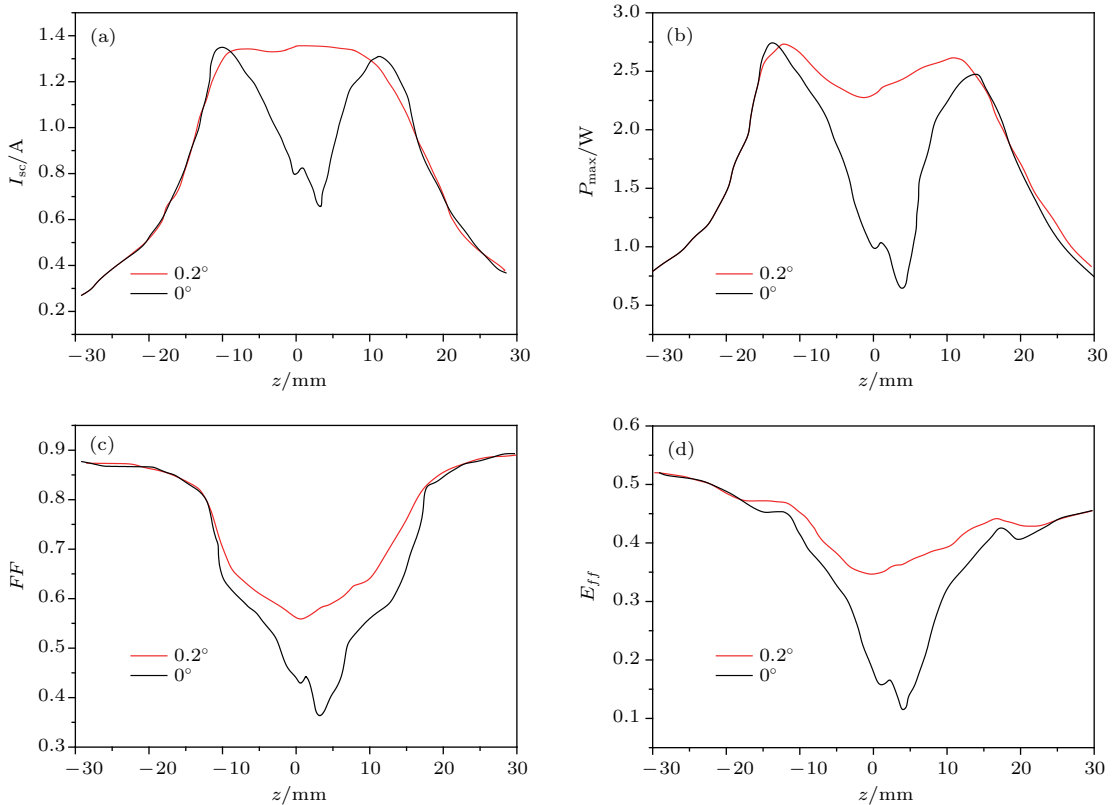


图11 非二次聚光下电池特性参数随光轴位置的变化(电池宽度5 mm)

Fig. 11. Parameters of the cell along with the change of optical axis positions (cell width is 5 mm).

由图11(b)可以看到,在发散角为 $0^\circ$ 和 $0.2^\circ$ 时,功率最大的光轴位置关于透镜设计焦点位置大致对称,而在焦点位置附近,功率有极小值.在设

计焦点附近有很大的光照非均匀性,导致填充因子有较大下降.以实际光照发散角为 $0.2^\circ$ 为例,无二次聚光时,三结电池焦点位置输出功率为2.3 W,

而焦点前后功率可以上升到2.7 W. 无二次聚光时, 优化三结电池的输出位置, 可以使得三结电池输出功率提高近17%.

图 12 为二次聚光下电池特性参数随光轴位置的变化情况. 二次聚光棱镜有明显降低聚光非均匀性的效果, 但在同样光轴位置, 和无二次聚光棱镜时相似, 不同波段的光斑宽度不一致, 增加二次聚光棱镜并不能使光照集中区域充分覆盖电池表面, 从而使得电池性能随光轴位置的变化趋势与无二次聚光时相似, 即在焦点附近最大功率及填充因子都有极小值.

由以上三个波段的光强分布可以得出, 在透镜焦点处, 三个波段的光强分布的非均匀性都增大了, 从而造成电池填充因子的下降, 进而导致电池

功率下降, 尽管该位置处的辐射功率最大. 电池功率的最大处, 是辐射功率和光强均匀程度的权衡. 由以上分析可以得出, 电池功率的最大处位于辐射功率略微下降, 光强分布较均匀的光轴位置.

相对无二次聚光, 二次聚光降低了辐射功率, 从而电池不能达到无二次聚光时所能达到的最大输出功率, 但二次聚光可提高模组接收角, 使得实际中对跟踪精度可适当降低, 并且相对无二次聚光, 二次聚光也有能提高电池功率的电池安装位置. 对于宽度为5 mm 的电池, 最佳位置位于透镜焦点前10 mm 处, 输出功率约为2.6 W, 相较于焦点位置2.3 W 的输出功率提升13%. 故实际中应根据跟踪精度, 合理选择二次聚光棱镜及电池安装位置, 对高倍聚光光伏模组进行优化.

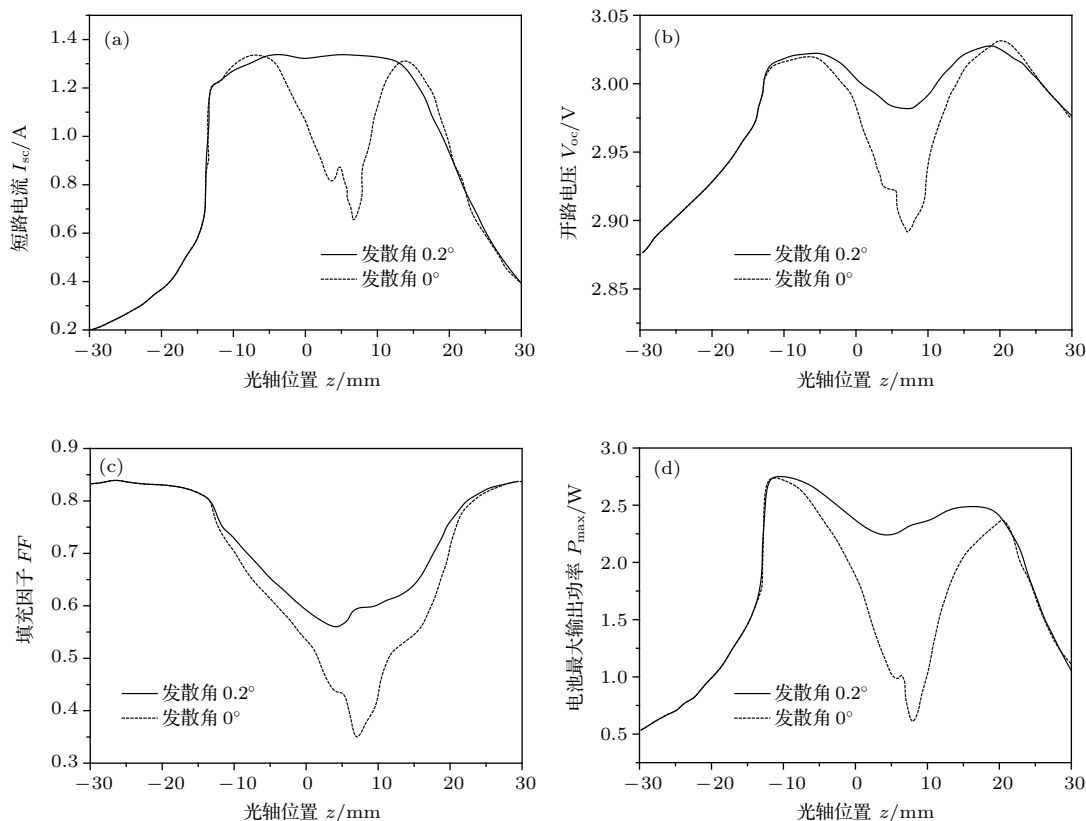


图 12 二次聚光下电池特性参数随光轴位置的变化 (电池宽度 5 mm)

Fig. 12. Parameters of the cell under secondary concentrated along with the change of optical axis positions (cell width is 5 mm).

## 4 HCPV 模组光电性能实验研究

### 4.1 菲涅耳透镜一次聚光

利用本实验室设计的室外双轴跟踪平台, 对菲涅耳透镜一次聚光条件下三结电池在不同位置的

输出特性进行测试分析. 实验在广州市中山大学工学院顶楼进行, 实验数据选取多次实验的平均数据. 结果表明, 三结电池的最大功率和填充因子在不同光轴位置会有很大差异. 由于电池表面光照非均匀性增加, 导致电池最大输出功率及填充因子在焦点位置处有明显下降. 图 13 为三结电池最大输

出功率随电池位置的变化.

图 14 为三结电池填充因子随电池位置的变化情况. 由实验数据计算分析可得, 焦点两侧位置的电池输出功率相较于焦点位置提升 14% 以上, 而填充因子则提升约为 11%, 这与模拟结果大体符合.

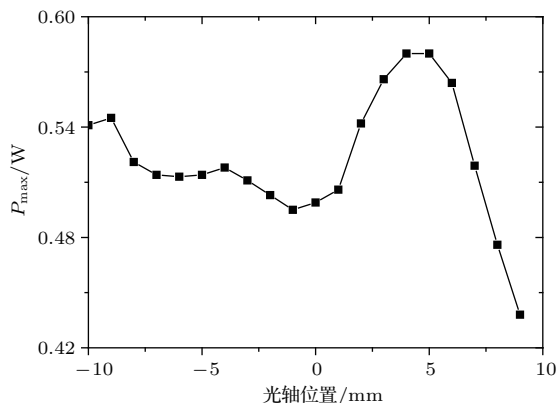


图 13 最大输出功率随电池位置的变化 (电池宽度 5 mm)

Fig. 13. Maximum power output along with the change of optical axis positions (cell width is 5 mm).

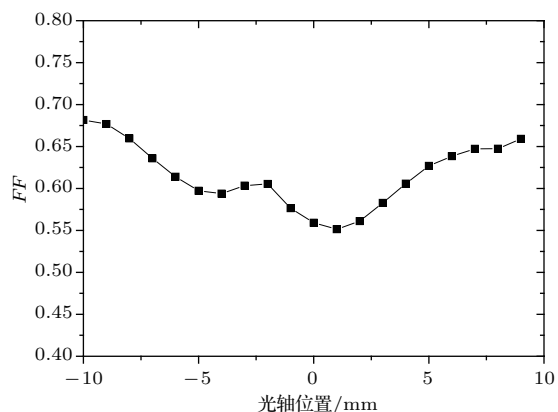


图 14 填充因子随电池位置的变化 (电池宽度 5 mm)

Fig. 14. Fill factor along with the change of optical axis positions (cell width is 5 mm).

## 4.2 二次聚光棱镜聚光

本实验将有无二次聚光装置的两种高倍聚光光伏模组安装于室外双轴跟踪系统平台进行室外测试. 选取 2017 年 10 月 20 日 14:00 的测试数据. 此时间段内环境温度 25 °C 上下, 波动幅度不超过 0.5 °C, 环境 DNI 800—900 W/m<sup>2</sup>.

图 15 为两种高倍聚光光伏模组温度分布图. 对比两种高倍聚光光伏模组的温度分布可以发现, 有二次聚光装置的高倍聚光光伏模组背板最高温度为 48 °C, 最低温度为 42 °C, 背板温差为 6 °C;

无二次聚光装置的高倍聚光光伏模组背板最高温度为 54 °C, 最低温度为 43 °C, 背板温差为 11 °C. 有二次聚光装置的高倍聚光光伏模组背板温度更均匀, 模组运行状况更优. 这也表明二次聚光棱镜具有比较好的光照均匀性, 进而温度分布也比较均匀. 模拟结果已得到实验验证.

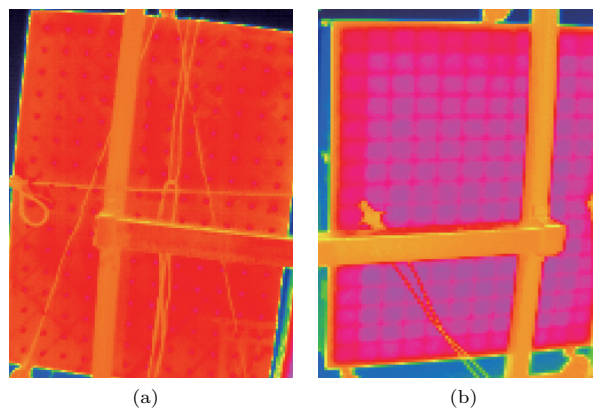


图 15 两种高倍聚光光伏模组温度分布 (a) 无二次聚光装置; (b) 有二次聚光装置

Fig. 15. Temperature distribution of two kinds of high concentrated photovoltaic modules: (a) No secondary concentrating system; (b) secondary concentrating system.

## 5 结 论

本文通过建立光学模型和非均匀光照的三维电池电路网络模型, 以 III-V 族三结电池为例, 模拟研究了菲涅耳透镜一次聚光、棱镜二次聚光的 HCPV 模组的聚光特性和光电特性. 结果发现: 由于菲涅耳透镜聚光存在光线非平行入射和色散现象, 使得在电池平面和聚光光轴上短、中、长波段聚光发散及聚光不均匀, 从而造成了三结电池的上、中、下三结子电池光谱响应失配损失, 模组输出功率最大位置并不在常规设计的焦平面上 (总聚光功率最大位置); 通过对光轴方向上短、中、长波段的聚光特性与三结电池光谱响应匹配优化, 可使电池输出功率到达极大值, 该位置也就是模组到达最大效率时的电池最佳安装位置.

本文研究结果对于有棱镜二次聚光和无二次聚光情况都是一样的, 只是有棱镜二次聚光时电池最佳安放位置向远离菲涅耳透镜偏移. 对采用棱镜二次聚光的高倍聚光光伏模组进行结构优化, 使得模组输出功率提高 10% 以上. 计算结果得到了实验验证.

## 参考文献

- [1] Helmers H, Schachtner M, Bett A W 2013 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **116** 144
- [2] Zhang W, Chen C, Jia R, Sun Y, Xing Z, Jin Z, Liu X Y, Liu X W 2015 *Chin. Phys. B* **24** 108801
- [3] Eduardo F F, Florencia A 2015 *Energy Convers. Manage* **103** 1031
- [4] Chen F X, Wang L S, Xu W Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 045202
- [5] Dimroth F, Tibbits T N D, Niemeyer M, Predan F, Beutel P, Karcher C, Oliva E, Siefer G, Lackner D, Fuskailuweit P, Bett A W, Krause R, Drazek C, Guiot E, Wasselin J, Tauzin A, Signamarcheix T 2016 *IEEE J. Photovolt.* **6** 343
- [6] van Riesen S, Neubauer M, Boos A, Rico M M, Gourdel C, Wanka S, Krause R, Guernard P, Gombert A 2015 *AIP Conf. Proc.* **1679** 100006
- [7] Baig H, Heasman K C, Mallick T K 2012 *Renew. Sust. Energy Rev.* **16** 5890
- [8] 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]
- [9] Lian R H, Liang Q B, Shu B F, Fan C, Wu X L, Guo Y, Wang J, Yang Q C 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 148801 (in Chinese) [连榕海, 梁齐兵, 舒碧芬, 范畴, 吴小龙, 郭银, 汪婧, 杨晴川 2016 物理学报 **65** 148801]
- [10] Li X, Lin G J, Liu H H, Chen S Y, Liu G Z 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 148801 (in Chinese) [李欣, 林桂江, 刘翰辉, 陈松岩, 刘冠洲 2017 物理学报 **66** 148801]
- [11] Steiner M, Guter W, Peharz G, Philipps S, Dimroth F, Bett A W 2012 *Prog. Photovolt.* **20** 274
- [12] Steiner M, Philipps S P, Hermle M, Bett A W, Dimroth F 2011 *Prog. Photovolt.* **19** 73
- [13] Espinet P, Garcia I, Rey-Stolle I, Algora C, Baudrit M 2010 *AIP Conf. Proc.* **1277** 24
- [14] Katz E A, Gordon J M, Tassew W, Feuermann D 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 044514
- [15] Segev G, Mittelman G, Kribus A 2012 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **98** 57
- [16] Rodrigo P, Fernández E F, Almonacid F, Pérez-Higueras P J 2013 *Renew. Sust. Energy Rev.* **26** 752
- [17] Yi S G, Zhang W H, Ai B, Song J W, Shen H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 028801
- [18] Ota Y, Nishioka K 2012 *Sol. Energy* **86** 476
- [19] Goma S, Yoshioka K, Saitoh T 1997 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **47** 339
- [20] Espinet-González P, Mohedano R, García I, Zamora P, Rey-Stolle I, Benitez P, Algora C, Cvetkovic A, Hernández M, Chaves J, Miñano J C, Li Y 2012 *AIP Conf. Proc.* **1477** 81
- [21] Cui M, Chen N F, Deng J X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 034216

# Concentrating characteristics of Fresnel lens with prism secondary concentrator and optimization of high concentrating photovoltaic module with triple-junction cell\*

Guo Yin Shu Bi-Fen<sup>†</sup> Wang Jing Yang Qing-Chuan Jiang Jing-Xiang  
Huang Yan Zhou Zheng-Long

(Institute for Solar Energy Systems (ISES), Guangdong Provincial Key Laboratory of Photovoltaic Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)

( Received 31 December 2017; revised manuscript received 7 March 2018 )

## Abstract

At present, Fresnel lens is commonly used as a concentrator in high concentrating photovoltaic (HCPV) module, and the triple-junction cell is currently one of the most common multi-junction cells used in it. The triple-junction cell is composed of three p-n junctions in series. Each sub-cell in it absorbs different-wavelength light. The solar cell efficiency of III-V multi-junction high concentrating photovoltaic increases up to 46%, which the corresponding module efficiency is quite different from. The output power of the solar cell is related to not only the illumination energy, but also the spectral distribution and the uniformity of the illumination. The loss caused by the non-ideal concentration of the concentrator in the module is as high as 20%. After sunlight enters the lens, the direction of transmission of a monochromatic light is different, because a lens has different refractive index for different-frequency light. So the light disperses when leaving the lens, and thus the colors are arranged in a certain order to form a spectrum. Owing to the dispersion and the differences in refractive index among different spectral bands, the illumination distributions of the three spectral bands are different and non-uniform on the focal plane of lens. The divergence of light will obviously weaken the non-uniformity of the illumination on the solar cell surface. So the divergence angle of the light source has a greater influence on the cell performance because the non-uniformity of illumination has a negative influence on the performance of the cell.

In this paper, according to the establishment of optical model and three-dimensional cell circuit network model under non-uniform illumination, taking III-V triple-junction cells for example, we study the concentrating characteristics and photovoltaic characteristics of HCPV module with Fresnel lens concentrator and prism secondary concentrator. The results show that due to the non-parallel incident light and dispersion of the Fresnel lens, the concentrating spots of short-wave light, medium-wave light and long-wave light are divergent and their illuminations are non-uniform, resulting in the spectral response mismatch loss of the three sub-cells in the triple-junction cell, and the photovoltaic performance of the HCPV module also declines. The results show that the secondary optics element is obviously effective in reducing the non-uniformity of the illumination and the temperature which the Fresnel lens creates. However, each waveband of light has a different spot size at the same position, similar to the Fresnel lens without the secondary optics element. So the varieties of cell performance at different positions are similar too. And, by optimizing the focusing characteristics of the three wave bands along the optical axis, the power output of the HCPV module can increase more than 10%. The simulation results are verified experimentally.

**Keywords:** high concentrating photovoltaic module, III-V triple-junction cell, prism secondary concentrator, non-uniformity

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

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172778

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1707603).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [shubifen@163.com](mailto:shubifen@163.com)