

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

梁齐兵 舒碧芬[†] 孙丽娟 张奇溜 陈明彪

(中山大学工学院, 太阳能系统研究所, 广州 510006)

(2014年4月9日收到; 2014年4月24日收到修改稿)

高倍聚光光伏组件通常采用光电转化效率较高的三结太阳能电池. 由于聚光器件的非理想性, 电池承受的光照分布通常是高度非均匀的, 在光伏组件中可通过适当增大光斑与电池面积的比率来降低光照非均匀性对电池电学性能的影响. 通过对某一特定三结电池进行电路网络建模计算, 分析光斑的强度分布和照射面积对电池的影响, 并对比了四种设计方案(均匀光照、非均匀光照、电池效率最大、组件效率最大)下的光斑强度、光斑大小、电池效率以及电池温度分布. 对比分析结果表明, 组件达到效率最大时的电池效率并不是电池在标准测试条件下的最大效率, 而使电池工作在效率最大值的设计方案中组件效率最低. 组件效率最大方案中使用的聚光器透镜面积较小, 因此该方案将导致组件成本增大. 电池效率最大方案中使用的聚光器透镜面积较大并且电池温度最低, 故该方案组件成本较低且可靠性较高. 这表明在实际组件设计中应充分考虑对发电量的实际需求, 选择合适的几何聚光倍数和光斑覆盖电池的比率.

关键词: 聚光光伏, 三结太阳能电池, 非均匀光照

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

DOI: 10.7498/aps.63.168801

1 引言

目前多结太阳能电池的转换效率已超过43%^[1]. 对于地面光伏应用领域, 为了降低成本, 多结太阳能电池被广泛用于聚光光伏组件中. 聚光光伏组件采用聚光装置将大面积的光照聚焦在面积较小的太阳能电池上, 从而有效降低组件成本. 聚光装置有很多种不同的形式, 采用菲涅耳透镜并结合二级光学元件的聚光装置是一种较理想的选择^[2]. 在实际组件中, 由于各种非理想因素的影响, 组件效率远低于电池效率. Baig等^[3]总结了九种影响组件最终效率的因素, 其中光照非均匀性导致组件效率下降4%, 温度引起组件效率下降7%. 因此, 控制组件中电池所承受的光照和温度分布对优化组件性能有重要意义.

电池电学性能通常采用标准测试条件(25 °C, 1000 W/m²)下电池电流与电压的关系(I - V 曲线)

表征. 对于高倍聚光电池, 通常以标准测试条件的光照强度作为1倍聚光比, 测试不同聚光倍数下电池的电学性能参数. 这种测试都是在严格控制光照均匀度下进行的. 然而, 实际组件中的聚光装置并不能使光照十分均匀^[3], 因此, 分析非均匀光照条件下电池的电学性能具有重要的实际意义.

传统的二极管并联电流源电路模型被广泛用于表征太阳能电池电学特性^[4]. 对于标准测试条件下的电池特性, 采用这种仅考虑电池总体电学特性的模型可以得到较好的结果. 但此模型忽略了光强和温度的不均匀性对电池造成的影响, 而这些影响在聚光电池中变得十分显著^[3]. 利用电路网络模型可细致地分析非均匀光照下太阳能电池的电学特性及优化电池结构^[5,6]. 由于其可以指定电池各个部分的光生电流和温度, 因而电路网络模型更适合于分析聚光电池的电学特性.

在电池电路建模分析中, 非均匀分布通常假定

[†] 通讯作者. E-mail: shubifen@163.com

为高斯分布^[7,8], 这种分布可近似代替实际情况下复杂的光照分布. 对于采用菲涅耳透镜的聚光装置, 此假设与实际情况十分接近^[9]. 基于高斯分布的光照形式, 本文对一种三结聚光电池进行了建模计算, 分析在四种不同几何聚光倍数和光斑大小的安装方案中该电池表现出的电学性能, 并对电池在组件中的安装方式进行了优化.

聚光光伏组件中的太阳电池通常具有较高的温度, 分析其温度的大小和分布有助于对组件性能进行优化^[10]. 温度计算通常是采用数值模拟方法, 在给定热学边界条件下对光伏组件接收器进行建模计算^[11,12]. 由于电池效率和电池温度分布相互影响, 因而本文采用电池电路计算和温度分析计算联合迭代的方法, 计算在不同安装方案下实际的电池效率和电池温度分布.

2 模型建立

2.1 太阳电池电路模型

为了表征电池各部分的电学特性, 把电池划分为各个相对独立的单元, 每个单元都用传统二极管电池模型代替, 各个单元用电阻关联. 在电路计算过程中, 可以单独指定各个单元的电学参数, 如电流源的电流大小、温度、电阻等. 因此, 此模型可用于计算电池在一定光照分布和温度分布下的电学性能.

本文采用的电池电路网络模型及模型电学参数与文献^[6]所用的模型及模型参数一致, 每个 p-n 结均用双二极管模型表示, 各个电池单元之间用横向电阻关联, 如图 1 所示. 这里不考虑各个 p-n 结之间的隧道二极管效应对电池电学性能的影响, 故可把文献^[6]中的隧道二极管都用电阻代替. 而文献^[6]并未考虑温度分布及其变化对电池光生电流的影响, 本文采用文献^[13]中短路电流的温度系数作为模型中各电流源的电流随温度变化的变化率, 以考虑上述因素的影响. 图 1 中, I_{Lt} , I_{Lm} , I_{Lb} 分别为电池上、中、下 3 个 p-n 结的光生电流; D_{1t} , D_{2t} , D_{1m} , D_{2m} , D_{1b} , D_{2b} 分别为各个 p-n 结的等效二极管; R_{tt} 为上、中 p-n 结之间的隧道结电阻; R_{tb} 为中、下 p-n 结之间的隧道结电阻; R_b 为电池基底电阻, 其余未标识的电阻为横向电阻.

由于电路网络模型中电子元件数量巨大, 本文使用 Python 语言脚本程序对电池模型参数进行处理, 生成电路计算软件 Ngspice 所需的电路描述文

件, 再根据 Ngspice 软件输出的电池 $I-V$ 曲线数据求得给定参数下的电池效率及最大输出功率.

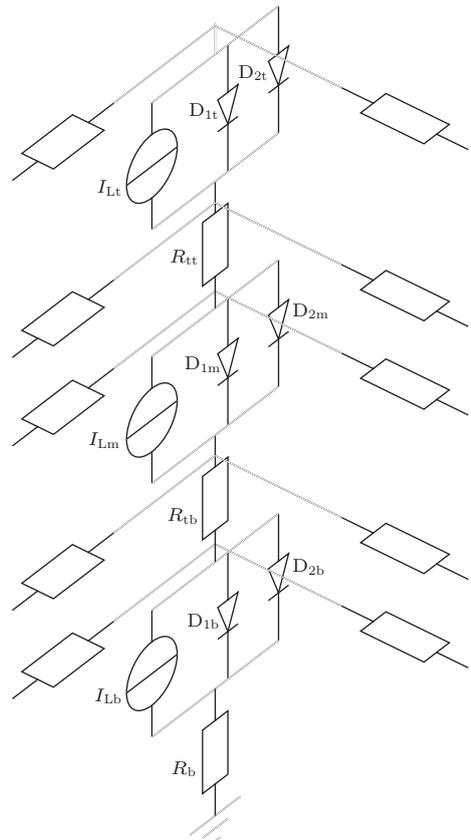


图 1 电路网络模型中的电池单元电路模型示意图

2.2 光照分布函数

这里定义标准光照强度 (聚光倍数为 1) 为 1000 W/m^2 , 标准温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$. 光照在电池表面上的非均匀分布用高斯分布近似代替,

$$f(x, y) = \frac{C_{\text{geo}} T_{\text{mirr}} A_{\text{cell}}}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \times \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中, f 为光照分布函数, 即为电池表面光强与标准光强之比; x, y 为位置坐标, 取值范围为 $-d/2 \sim d/2$, 其中 d 为电池宽度; C_{geo} 为几何聚光倍数, 即为透镜面积与电池面积之比, 在非均匀光照条件下 C_{geo} 的值并不是电池表面实际接收到的光照能量与标准光强下电池表面接收到的光照能量的比值, 只是不考虑光照实际分布情况下的光照倍数设计值; T_{mirr} 为聚光器件透过率, 固定 $T_{\text{mirr}} = 0.8$; A_{cell} 为电池面积; σ 为高斯分布的标准方差. σ 决定了光斑分布的形态, 这里用 6σ 表示方形光斑的边长, 即 x 方向和 y 方向 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 为本文所研究

的光斑范围, 故光斑面积 $A_{\text{spot}} = 36\sigma^2$. 光斑覆盖率 ρ 为光斑面积与电池面积之比,

$$\rho \equiv \frac{A_{\text{spot}}}{A_{\text{cell}}}. \quad (2)$$

由 (2) 式并结合 A_{spot} 和 σ 的关系可得到不同光斑覆盖率下 σ 的具体值, 从而得到不同的光照分布. σ 可表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\rho A_{\text{cell}}}{36}} = \frac{\sqrt{\rho A_{\text{cell}}}}{6}. \quad (3)$$

2.3 温度分布计算模型

为了获取在一定散热条件下电池正常工作时的温度分布, 采用有限元方法对一个聚光光伏组件接收器进行了模拟计算. 接收器模型由 7 层材料叠加而成, 最上层为三结太阳能电池, 中间层为直接敷

铜板 (DBC, 在陶瓷层两面各敷上一层铜)^[12], 接收器的安装底板为铝板. 各主要结构层由焊锡焊接, 接收器模型的具体示意图如图 2 所示. 模型各层材料及尺寸列于表 1, 表中的材料参数参见文献 [12].

由于底板大小不能超过组件单元聚光透镜尺寸, 因此, 取底板大小与聚光透镜尺寸一致, 由几何聚光倍数推算底板大小.

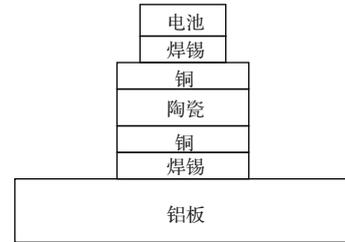


图2 聚光光伏组件接收器结构示意图

表1 温度计算模型的材料参数和尺寸

层序	材料	用途	导热系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	厚度/mm	长度/mm	宽度/mm
1	Ge	电池	60.0	0.20	0.217	0.217
2	95Sn-5Ag	焊锡	37.8	0.05	0.217	0.217
3	Cu	DBC	385.0	0.30	7.600	7.600
4	96% Al_2O_3	DBC	25.0	0.38	7.600	7.600
5	Cu	DBC	385.0	0.50	7.600	7.600
6	95Sn-5Ag	焊锡	37.8	0.05	7.600	7.600
7	Al	底板	238.0	5.00	$0.217C_{\text{geo}}^{-2}$	$0.217C_{\text{geo}}^{-2}$

计算温度时, 取电池为热源. 热源的发热功率为电池表面总光照能量中转化为热能部分与电池体积之比,

$$Q(x, y) = \frac{Gf(x, y)A_{\text{cell}}(1 - \eta_{\text{cell}})}{t_{\text{cell}}A_{\text{cell}}}, \quad (4)$$

式中, Q 为热源发热功率; G 为标准光照强度, $G = 1000 \text{ W/m}^2$; η_{cell} 为电池光电转换效率, 其和温度有关; t_{cell} 为电池厚度.

温度计算中假定接收器处于空气自然对流的环境中, 取铝板下表面的对流换热系数为 $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, 各层上表面与空气接触部分的对流换热系数为 $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

3 计算结果及分析

3.1 电池的电学特性

当温度给定、光照均匀时, 对不同几何聚光倍数下的电池电路模型进行了计算, 结果如图 3 所示.

从图 3 可以看出: 电池存在一个最大效率点, 当几何聚光倍数超过该点对应的值时, 电池效率逐渐下降; 电池效率的最大值随温度的升高而降低, 同时最大效率对应的几何聚光倍数随温度的升高而增大. 根据图 3 所示曲线, 可以将组件的几何聚光倍数设计为使电池达到最大效率的几何聚光倍数. 由于该几何聚光倍数受温度的影响, 因此, 假定实际工作温度为 65°C , 因该温度为模型计算的假定温度, 故称其为设计温度. 由图 3 可知, 设计温度对应的电池达到最大效率的几何聚光倍数为 454.4.

在光照分布函数中, 令 3σ 等于电池宽度的 $1/2$, 此时光斑覆盖率 $\rho = 1$, 即按高斯分布的 3σ 法则设计电池接收光照的范围. 这种情况下电池效率随几何聚光倍数的变化如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 光斑覆盖率 $\rho = 1$ 时的电池特性和均匀光照时的电池特性相似, 但电池效率的最大值对应的几何聚光倍数向低倍方向偏移, 超过该几何聚光倍数后, 电池效率下降得更快. 本文的第二种设计方案是根据该非均匀光照条件下的电池特性曲线设计

组件聚光装置的几何聚光倍数. 由图4可知, 该设计方案中, 设计温度对应的电池达到最大效率的几何聚光倍数为185.1.

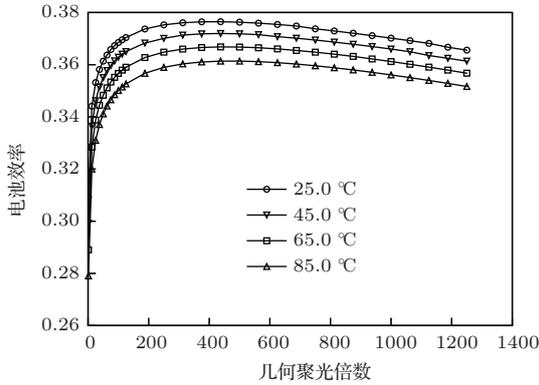


图3 均匀光照条件下电池效率随几何聚光倍数的变化

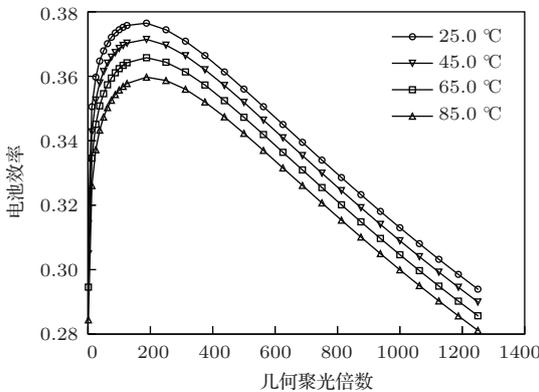


图4 光斑覆盖率 $\rho = 1$ 时, 非均匀光照条件下电池效率随几何聚光倍数的变化

对于高斯分布形式的非均匀光照, 当光斑覆盖率小于1时, 高斯分布的 3σ 范围小于电池面积, 此时光照能量基本上都集中于电池表面. 光斑覆盖率越小, 光照能量越集中于电池上, 但此时光照的非均匀程度越大. 当光斑覆盖率大于1时, 会有一部分光未照到电池上, 从而造成电池性能一定程度的下降, 但此时光照的非均匀程度得到缓解, 进而减少了光照非均匀性对电池性能的影响. 图5为设计温度下电池效率随光斑覆盖率和几何聚光倍数的变化. 为了方便观察, 图5的横轴为光斑覆盖率开方的倒数. 从图5可以看出, 电池效率的最大值并不位于采用 3σ 法则时光斑覆盖率为1的位置, 而是位于光斑大小略微超出电池面积之处, 电池效率最大值所对应的几何聚光倍数和光斑覆盖率分别为438.3和3.32.

定义组件效率为电池输出功率与入射到组件单元聚光装置总光照能量之比,

$$\eta_{\text{mod}} \equiv \frac{P_{\text{cell}}}{GA_{\text{mod}}} = \frac{P_{\text{cell}}}{GC_{\text{geo}}A_{\text{cell}}}, \quad (5)$$

式中, η_{mod} 为组件效率, P_{cell} 为电池输出功率, A_{mod} 为组件单元面积.

图6为设计温度下, 组件效率随光斑覆盖率和几何聚光倍数的变化. 对比图6和图5可以看出, 组件效率最大值的位置并不与电池效率最大值的位置一致. 由图6可知, 组件效率最大值对应的几何聚光倍数和光斑覆盖率分别为173.8和0.91.

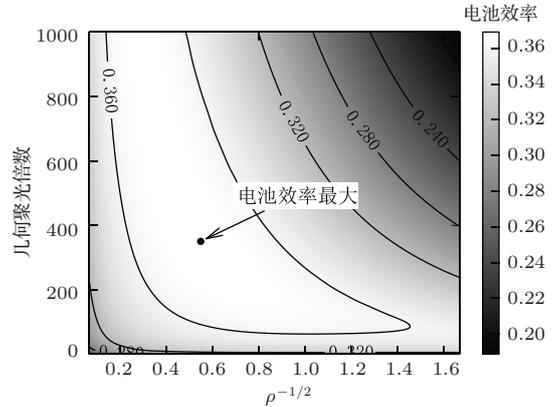


图5 电池效率随光斑覆盖率和几何聚光倍数的变化

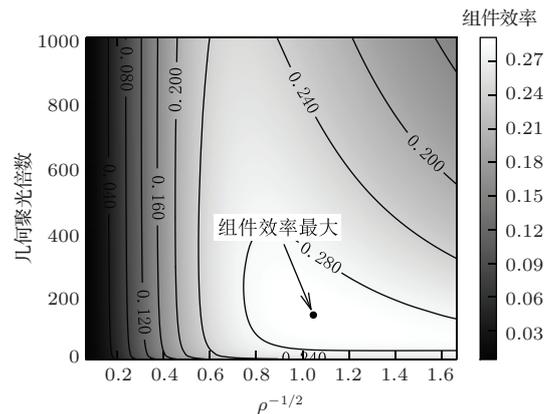


图6 组件效率随光斑覆盖率和几何聚光倍数的变化

表2列出了均匀光照、光斑覆盖率为1的非均匀光照、电池效率最大、组件效率最大四种设计条件下几何聚光倍数和光斑覆盖率, 以及不同设计方案下电池效率和组件效率的预期值.

3.2 电池表面实际温度分布

组件中电池温度由电池效率和散热条件决定, 而电池效率又受温度分布的影响, 因此, 有必要研究电池表面的实际温度分布. 本文采用迭代算法具体计算电池温度分布. 首先, 给定一个电池效率初始值, 由有限元方法计算出温度分布; 然后, 将该温度分布作为电路网络模型的输入, 计算出电池效率, 再将该效率作为有限元模型的输入. 由此迭代, 最终可得到实际温度分布和相应的电池效率.

表2 四种设计方案下几何聚光倍数、光斑覆盖率以及相应的电池效率和组件效率

方案编号	具体方案	几何聚光倍数	光斑覆盖率	电池效率	组件效率
1	均匀光照	454.4	1.00	0.367	0.294
2	非均匀光照 ($\rho = 1$)	185.1	1.00	0.366	0.291
3	电池效率最大	438.3	3.32	0.369	0.239
4	组件效率最大	173.8	0.91	0.365	0.291

图7为采用不同设计方案得到的实际温度分布. 从图7可以看出, 实际的电池工作温度在60 °C左右, 比标准温度高, 但与设计温度较接近. 表3列出了不同方案下实际温度的最大值和最小值以及相应的电池效率和组件效率.

综合图7和表3可以看出, 方案1的电池效率最低, 温度最高, 温度分布的非均匀程度最大, 与表2对比可知, 该方案的电池效率和组件效率与预期值的偏差最大. 方案1未考虑光照非均匀性对电池效率的影响, 从而导致设计的几何聚光倍数较高. 几何聚光倍数越高, 光照非均匀性对电池影响越显著, 这种非均匀光照也加强了温度分布的非均匀性, 从而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. 因此, 光照非均匀性应作为组件设计的考虑因素, 从而减小设

计预期值和实际组件性能的偏差.

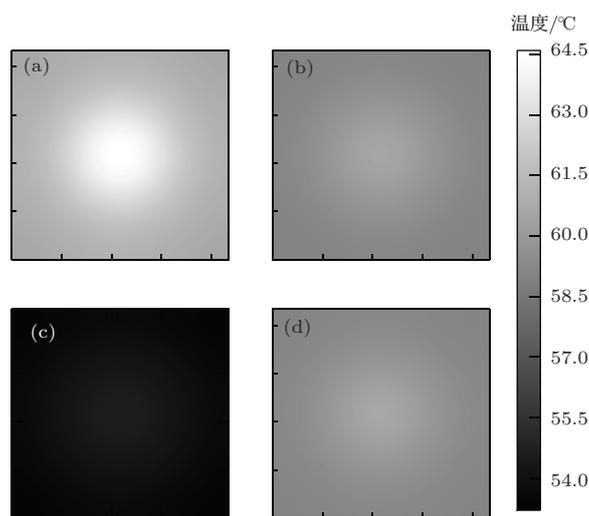


图7 采用不同设计方案得到的电池表面实际温度分布 (a) 方案1; (b) 方案2; (c) 方案3; (d) 方案4

表3 四种设计方案下实际温度的最大值、最小值以及相应的电池效率和组件效率

方案编号	具体方案	最大温度/°C	最小温度/°C	电池效率	组件效率
1	均匀光照	64.6	60.6	0.351	0.280
2	非均匀光照 ($\rho = 1$)	60.6	59.0	0.367	0.292
3	电池效率最大	54.6	53.2	0.372	0.241
4	组件效率最大	60.7	59.1	0.367	0.292

由表3可知, 使电池效率和组件效率达到最大值的几何聚光倍数和光斑覆盖率并不一致, 这与表2所列的结果相似. 增大光斑覆盖率可以减少光照非均匀性对电池效率的影响, 但这样会使得光照能量不能全部集中于电池上, 通过提高几何聚光倍数可以弥补这种损失, 从而使得电池效率达到最大值, 也使得电池温度达到最低值. 但是, 提高几何聚光倍数和增大光斑覆盖率会降低组件效率. 为了提高组件效率, 要使经过透镜的光尽可能地都照射在电池上, 同时光照非均匀性不能过大. 由表3所列数据可知, 光斑覆盖率为0.9是一个合适的界限, 在该值下, 99% 以上的光照能量都位于电池范围内, 而且此时电池所处状态和方案2中电池所处状

态十分接近(表2), 电池效率接近非均匀光照方案下电池的最大效率. 因而方案4和方案2的几何聚光倍数和光斑覆盖率相差很小.

计算得到方案2和方案4的组件效率最高, 但这两种方案的几何聚光倍数都较低, 因为几何聚光倍数是聚光器透镜面积与电池面积的比值, 从而导致此时的聚光器透镜面积变小, 因此, 这两种方案不能很好地降低组件成本. 方案1的组件效率比方案3的组件效率高, 而和另两种方案相比, 方案1的组件效率下降得并不大, 而且方案1的几何聚光倍数最大, 因此, 若温度升高带来的可靠性问题不严重, 方案1是一种简便有效的设计方案.

4 结 论

从电路网络模型出发,并结合高斯分布的非均匀光照,本文对比了四种设计方案(均匀光照、非均匀光照、电池效率最大、组件效率最大)下一个特定三结电池的电池效率和组件效率.研究表明,在组件效率达到最大的方案中电池效率并不是最大;在电池效率达到最大的方案中组件效率反而最低.一般情况下,采用均匀光照假定可以得到较高的几何聚光倍数和适中的组件效率,但这种方案会导致电池温度较高,温度的非均匀程度较大,这对组件可靠性有一定的负面影响.在组件效率最大的设计方案中使用的聚光器透镜面积较小,这会导致组件成本增大;而在电池效率最大的设计方案中使用的聚光器透镜面积较大,若是对组件的效率要求不高,可以采用此种设计方案,在此方案下,电池工作温度最低,因而可以得到较好的组件可靠性.

参考文献

- [1] Green M A, Emery K, Hishikawa Y, Warta W, Dunlop E D 2014 *Prog. Photovoltaics* **22** 1
- [2] Chen N F, Bai Y M 2007 *Physics* **36** 862 (in Chinese) [陈诺夫, 白一鸣 2007 物理 **36** 862]
- [3] Baig H, Heasman K C, Mallick T K 2012 *Renew. Sust. Energy Rev.* **16** 5890
- [4] Rodrigo P, Fernández E F, Almonacid F, Pérez-Higueras P J 2013 *Renew. Sust. Energy Rev.* **26** 752
- [5] Steiner M, Philipps S P, Hermle M, Bett A W, Dimroth F 2011 *Prog. Photovoltaics* **19** 73
- [6] Steiner M, Guter W, Peharz G, Philipps S P, Dimroth F, Bett A W 2012 *Prog. Photovoltaics* **20** 274
- [7] Garcia I, Algora C, Rey-Stolle I, Galiana B 2008 *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (New York: IEEE) p1
- [8] Domenech-Garret J L 2011 *Sol. Energy* **85** 256
- [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] Cui M, Chen N F, Deng J X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 034216
- [11] Cui M, Chen N F, Deng J X, Liu L Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 084208
- [12] Cotal H, Frost J 2010 *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (New York: IEEE) p213
- [13] Friedman D J 1996 *Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (New York: IEEE) p89

Optimization of light spot intensity and coverage to a triple-junction solar cell under non-uniform illumination

Liang Qi-Bing Shu Bi-Fen[†] Sun Li-Juan Zhang Qi-Zi Chen Ming-Biao

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

(Received 9 April 2014; revised manuscript received 24 April 2014)

Abstract

The cells in high concentrated photovoltaic module are usually high efficiency triple-junction solar cells. Due to the non-ideal concentrators, the light intensity distribution on a solar cell is highly non-uniform, so the appropriate increase of the ratio between light spot size and cell area is a method to reduce the influence of non-uniform illumination on the electrical performance of the solar cell. The circuit network model is used to calculate the influences of light spot intensity distribution and size on a triple-junction solar cell. The light spot intensities and sizes, the cell efficiencies, and the temperature distributions of the cell under four design schemes (uniform illumination, non-uniform illumination, maximum cell efficiency, and maximum module efficiency) are compared. The results show that the cell efficiency in the maximum module efficiency design is not the maximum cell efficiency under the standard testing condition. The design to make the cell achieve the maximum efficiency obtains the minimum module efficiency. The design to achieve maximum module efficiency has a smaller size of concentrator, so the cost of the module goes up. The design to achieve the maximum cell efficiency has a bigger size of concentrator and a lowest cell temperature, so the cost of the module will reduce and the reliability will improve. Above all, the requirement of electricity quantity should be fully considered in the module design, in which an appropriate geometric concentration ratio and light spot coverage to solar cells should be chosen.

Keywords: concentrated photovoltaic, triple-junction solar cell, non-uniform illumination

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

DOI: [10.7498/aps.63.168801](https://doi.org/10.7498/aps.63.168801)

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