

聚光能流参数对背接触电池阵列输出特性的影响

蔡伟平¹ 李明^{1,2} 季旭² 罗熙² 许成木² 高国栋² 凌德力¹

(¹ 云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650092)
(² 云南师范大学太阳能研究所, 云南 昆明 650092)

摘要 主要研究了聚光能流特性对槽式聚光热电联供系统电输出性能的影响。通过 CCD 相机测量不同距离和不同镜面开口宽度焦平面上的能流分布图获取能流值分布矩阵, 提取能流参数, 包括相对平均能流值、不均匀度、峰值偏离度和能流利用率。通过引入聚光条件下电池内部复合机制和寄生电阻, 建立了聚光电池阵列的双指数等效电路模型, 模拟结果与实验结果吻合得较好。结果表明, 短路电流和相对最大功率随相对平均能流值的增加而增加, 两者的增大率分别因复合机制的增强和寄生电阻欧姆损失的增大而减小; 开路电压随不均匀度和峰值偏离度的增大而减小; 相对平均能流值因寄生电阻欧姆损失对填充因子影响最大; 电池的效率由能流利用率和相对平均能流值决定。以 6 片串联 2 cm×2 cm 的背接触电池阵列为例, 当镜面开口宽度为 157 cm、距焦平面 2 cm 时, 平面上的能流分布最适合电池阵列的性能输出。

关键词 光电子学; 太阳能; 最佳性能输出; 能流参数; 背接触电池; 不均匀度; 相对平均能流

中图分类号 TN304 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0508001

Influence of Concentrated Illumination Parameters on the Output Characteristics of Back Contact Solar Cell Array

Cai Weiping¹ Li Ming^{1,2} Ji Xu² Luo Xi² Xu Chengmu²
Gao Guodong² Ling Deli¹

¹ School of Physics and Electric Information, Yunnan Normal University,
Kunming, Yunnan 650092, China

² Institute of Solar Energy, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China

Abstract This work investigates the influence of the concentrated illumination characteristics on the electrical output performance of photovoltaic/thermal system under trough concentrated sunlight. By measuring the illumination distribution at the focal plane for different distances and different opening widths of mirror with the CCD camera, the illumination value distribution matrix is acquired, from which illumination parameters such as average illumination value, nonuniformity, peak deviation degree and illumination utilization ratio are extracted. The double exponential equivalent circuit model of the concentrator solar cell array is acquired by introducing recombination mechanism and parasitic resistance of the cell under the concentrated sunlight, and the simulation results agree well with the experimental records. The results show that the short circuit current and the relative maximum power increase with the increase of the relative average illumination value, and the degree of increase becomes smaller due to the intensifying of the recombination mechanisms and the increase of the ohmic losses for parasitic resistance, respectively. The open circuit voltage decreases with the increase of the non-uniform illumination degree and the peak deviation degree. The relative average illumination value has a greatest influence on the fill factor because of the ohmic losses for parasitic resistance. The conversion efficiency of solar cell depends on the illumination utilization

收稿日期: 2012-12-10; **收到修改稿日期**: 2013-01-03

基金项目: 国家自然科学基金 (50966004, 51106134)、高等学校博士学科点专项科研基金 (20095303110001) 和教育部长江学者和创新团队发展计划资助课题。

作者简介: 蔡伟平 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事太阳能槽式聚光热电联供方面的研究。E-mail: weipingcai@126.com

导师简介: 李明 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事太阳能制冷空调、太阳能聚光发电等方面的研究。

E-mail: lmlldy@126.com (通信联系人)

ratio and the relative average illumination value. Taking series array of 6 pieces of 2 cm×2 cm back contact cells as an example, it can be concluded that, when the opening width of mirror is 157 cm and the distance from focal plane is 2 cm, the illumination distribution is the most suitable for the performance output of the back contact solar cell array.

Key words optoelectronics; solar energy; optimal performance output; illumination parameter; back contact solar cell; nonuniformity; relative average illumination value

OCIS codes 080.1753; 160.6000; 350.4600; 350.6050

1 引 言

聚光光伏发电系统是最常见的太阳能发电系统之一,与平板光伏发电系统相比,其优势在于提高整个发电系统效率的同时减少半导体材料的使用^[1]。理论上,太阳电池的开路电压随能流密度的增大成自然对数增大,而短路电流随能流密度的增大成线性增大^[2],但是由于聚光能流的特性,如高光强、高温、能流和温度的不均匀分布,以及太阳电池自身寄生电阻的影响,使开路电压聚光后的增大程度受到严重影响^[1~4]。国内外学者在聚光能流对太阳电池输出特性的影响方面做了很多工作:Luque 等^[5]的研究表明,聚光系统的能流剖面一般是非均匀的;Johnston 等^[6,7]分别从模拟和实验的角度证实,聚光能流不均匀分布通过减小填充因子(FF)和开路电压(V_{oc}),对太阳能电池的性能输出有负面的影响。Franklin 等^[7]通过考虑分布二极管效应和非均匀能流的影响,设计了电池的二维模型。Mellor 等^[8]提出太阳电池前表面电流分布的二维有限元模型,该模型考虑了分布二极管效应,进一步减小了Franklin 所提出模型中电池发射极横向电流垂直流入次栅线限制。Juan-Luis^[9]研究了存在不规则能流分布和温度分布时太阳电池的输出特性,结果显示,随着能流密度和温度峰值的增大,填充因子和开路电压相应减小。Galiana 等^[10]考虑了太阳电池在聚光能流特性下的很多影响因素,如电池内部寄生电阻的分布、表面栅线的遮挡等,并设计了一种GaAs 太阳电池的三维双二极管模型。

虽然关于能流密度对太阳电池输出特性影响的研究很多,但是大多数研究是基于高斯能流分布下聚光电池的内部机理设计和优化的,而没有从聚光能流特性角度详细研究能流与聚光电池输出特性的关系。本文基于槽式抛物聚光热电联供系统,通过 CCD 相机测量能流密度灰度图,并从计算所得能流分布值组成的矩阵中提取能流参数。通过改变聚光器至焦平面的距离和聚光器的开口宽度来研究能流参数对聚光电池阵列输出特性参数的影响,进而确定最适合电池阵列高效输出的能流分布。

2 理论推导

2.1 聚光能流密度分布的特性参数

通过软件处理 CCD 相机拍摄的焦平面处聚光能流密度灰度图,得到三维能流密度的灰度分布图,如图 1 所示。图 1 中 x 轴方向代表的是槽式聚光镜的长度方向, y 轴方向代表的是聚光镜的开口宽度方向, z 轴方向代表的是聚光能流密度的灰度值。

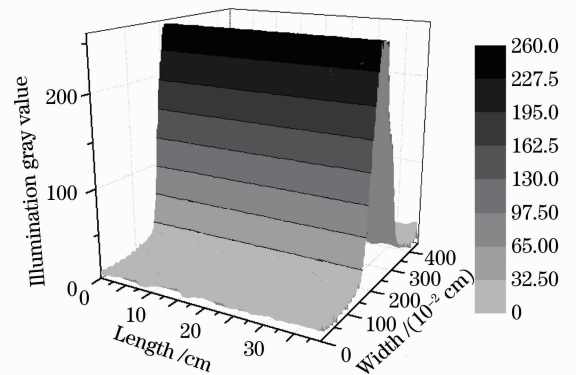


图 1 焦平面处聚光能流密度灰度值的三维分布图
Fig. 1 Three-dimensional pattern of gray value of concentrator illumination density at focal plane

从图 1 中可知,对线性聚光器来说,能流密度分布线性方向的能流密度不会变化,在横向剖面方向,能流密度呈高斯分布^[1,5,7]。因此,能流密度分布的特性反映的是横向剖面的分布特性。以下利用统计学原理对横向剖面能流分布的特性进行表征。

平均能流参数 μ ,用来度量实际分布能流值在聚光电池宽度范围内的平均值。由于平均能流参数 μ 的大小与太阳直射 D 相关,因此,为了在不同能流密度条件下比较平均能流的大小,提出相对平均能流参数 μ_{rel} ,其表达式为

$$\mu_{rel} = \frac{\mu}{D} = \frac{1}{nD} \sum_{i=-n}^n G_i, \quad (1)$$

式中 G_i 为横向剖面能流密度分布曲线离散化的能流值, n 为聚光电池宽度范围内的能流离散值。

能流不均匀度参数 S_0 ,用来度量聚光电池宽度范围内实际分布能流值偏离平均能流值波动大小的离散程度:

$$S_0 = \sqrt{\frac{1}{2n-1} \sum_{i=-n}^n (G_i - \mu)^2}. \quad (2)$$

能流峰值偏离度 L , 用来表示聚光电池宽度范围内的最大能流值与平均能流值之比^[1]:

$$L = \frac{G_{\max}}{\mu}, \quad (3)$$

式中 G_{\max} 为电池宽度范围内最大能流值; 当能流不均匀度参数 S_0 大小相当时, 能流峰值偏离度的大小能进一步确定能流的不均匀程度。

通过灰度图转换的灰度值矩阵可知, 聚光能流的宽度为 $(-l, l)$, 聚光电池宽度范围为 $(-n, n)$; 对聚光热电联供系统的电性能来说, 当 $l \geq n$ 时, $(-n, n)$ 范围内的能流密度为有效能流密度 $G_{\text{available}}$, 所以聚光能流密度的利用率 τ 为 $G_{\text{available}}$ 与 G_{total} 的比值, 即

$$\tau = \frac{G_{\text{available}}}{G_{\text{total}}} = \frac{\sum_{i=-n}^n G_i}{\sum_{i=-l}^l G_i}. \quad (4)$$

$$I = I_{\text{ph}} - \left(\frac{qSA_{\text{surface}}}{A} + \frac{qt_c n_i}{\tau_{\text{SRH}}} + I_{02} \right) \exp\left[\frac{1}{2} \frac{q(U + IR_s)}{kT} \right] - I_{01} \exp\left[\frac{q(U + IR_s)}{kT} \right] - \frac{U + IR_s}{R_{\text{sh}}}, \quad (8)$$

式中 I_{01} 为基极和发射极反向饱和电流, I_{02} 为耗尽区反向饱和电流, t_c 为电池基极厚度, S 为电池表面复合率, A_{surface} 为发射极表面空穴浓度大于电子浓度的部分, A 为电池表面面积, τ_{SRH} 为少子寿命, R_s 为聚光电池的串联电阻, R_{sh} 为聚光电池的并联电阻。(8)式即为聚光条件下太阳电池的双指数等效电路模型。

3 实验设计与测量

3.1 聚光能流密度的测量系统设计

能流测量系统利用 CCD 工业相机、朗伯靶、衰减片、计算机等对槽式聚光系统不同焦平面处的能流密度分布进行测量, 如图 2 所示。

用 CCD 工业相机测量聚光能流密度分布的方法已通过蒙特卡罗法得以验证, 能流密度测量与蒙特卡罗法计算之间的误差为 6.85%^[13]。聚光能流灰度图的像素大小与聚光能流密度的实际值成正比, 比例系数 K 可由 CCD 工业相机在非聚光条件下拍摄的均匀能流图的灰度值与实际太阳能总辐照值确定^[13~15]:

$$G_i = KG_v, \quad (9)$$

式中 G_i 为实际能流密度, G_v 为对应的测量灰度值。

2.2 聚光太阳电池的输出特性

在中低倍聚光条件下, 需要对太阳电池的双指数等效电路模型^[10]进行修正^[2]。通过考虑在聚光条件下聚光电池的肖克莱-里德-霍尔(SRH)复合^[(5)式]和表面复合^[(6)式]特性会增强^[11], 则可得低倍聚光条件下聚光电池的 I - V 特性方程:

$$I_{\text{SRH}} = \frac{qt_c n_i}{\tau_{\text{SRH}}} \exp\left(\frac{1}{2} \frac{qU}{kT}\right), \quad (5)$$

$$I_{\text{surface}} = qSA_{\text{surface}} n_i \exp\left(\frac{1}{2} \frac{qU}{kT}\right), \quad (6)$$

$$I = I_{\text{ph}} - \left(\frac{qSA_{\text{surface}} n_i}{A} + \frac{qt_c n_i}{\tau_{\text{hl}}} + I_{02} \right) \times \exp\left(\frac{1}{2} \frac{qU}{kT}\right) - I_{01} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right). \quad (7)$$

考虑到聚光条件下寄生电阻, 即串联电阻 R_s 和并联电阻 R_{sh} 对聚光电池输出性能的影响^[12], (7)式可修改为

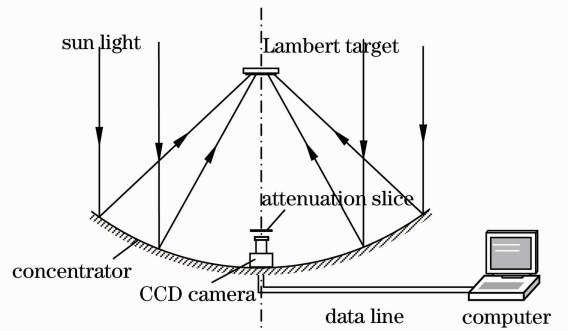


图 2 CCD 测量槽式聚光能流分布装置示意图

Fig. 2 Device schematic diagram of trough concentrator illumination distribution measured by CCD

3.2 槽式聚光热电联供系统的设计

实验采用槽式抛物聚光镜的开口宽度为 1.57 m, 镜面长度为 1.16 m, 几何焦距为 1.06 m, 镜面反射率为 0.85。采用光电传感被动双轴跟踪系统, 跟踪精度达到 0.06°。太阳电池阵列采用 6 片 2 cm × 2 cm 规格的硅基背接触电池串联, 采用硅基背接触电池研究的优势在于^[11,16]: 1) 电池的受光面没有栅线的遮挡, 不但增强了电池的光学效率, 而且减小了金属-半导体之间的接触电阻; 2) 电池基极的横向电流较小。与砷化镓电池的价格相比, 硅基背接触电池更适用于中低倍聚光光伏系统^[2]。聚光后, 背接触电

池阵列背面采用非循环恒温水冷却,冷却导热管内部分为圆形六翅片形状,该设计主要针对高斯分布的能流密度,使得整个电池阵列的温度趋于均匀^[17]。由于硅材料太阳能电池升高 1 ℃,电池的开路电压减小 1.6 mV^[12,18],由实验结果可知,在保持恒流低温冷却水条件下,温度对开路电压的影响较不均匀性的影响要小^[19,20],本文中不考虑其影响。

4 实验结果与分析

4.1 不同聚光条件下的能流参数提取

为获得不同槽式聚光能流密度分布的参数特性,通过实验拍摄了镜面距焦平面不同距离以及不同镜面开口宽度的能流密度灰度图,经过图像处理软件获得图片的灰度值矩阵,并通过灰度值与实际

能流值的转换公式[(9)式]获得能流密度的实际分布情况^[21]。如图 3(a)所示,焦平面处能流呈高斯分布,随着至焦平面距离的增大,峰值能流减小,聚光光斑变宽,且能流分布中心越来越小。如图 3(b)所示,不同镜面开口宽度焦平面处能流都呈高斯分布,随着开口宽度的减小,最大峰值能流减小,聚光光斑变窄。

将软件分析所得的实际能流密度矩阵,通过(1)~(4)式分别计算获取聚光器焦平面和距离焦平面分别为 3, 2, 1 cm 的平面上聚光电池宽度范围内的能流参数,以及不同镜面开口宽度的聚光器焦平面上聚光电池宽度范围内的能流参数,计算结果分别如表 1 和表 2 所示。

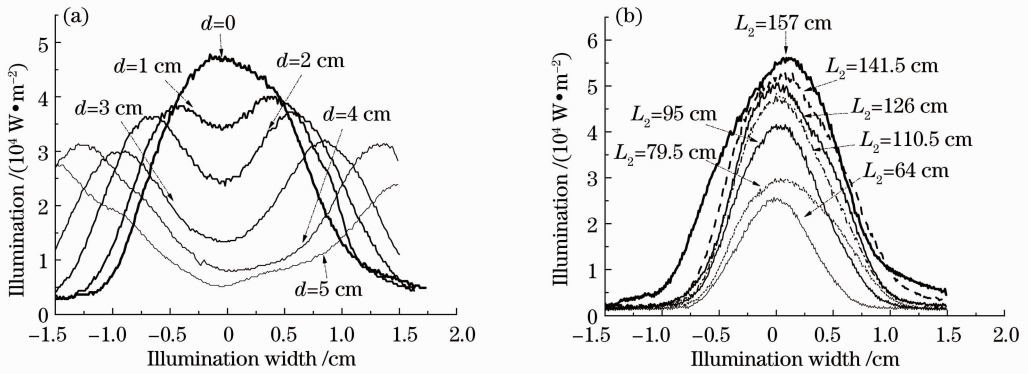


图 3 (a)离焦平面不同距离和(b)不同镜面开口宽度焦平面处聚光能流密度分布图

Fig. 3 Concentrator illumination density profiles for (a) different distances from focal plane and (b) different open widths of mirror

表 1 距焦平面不同距离处能流参数

Table 1 Illumination parameters at plane of different distances from focal plane

Distance from focal plane d /cm	Direct radiation $D /(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	Average illumination value $\mu /(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	Relative average illumination value μ_{rel}	Nonuniformity S_0	Peak deviation degree L	Illumination utilization ratio τ
3	889	22305	25.0	6544.45	1.43	0.608
2	929	27549	29.7	4237.28	1.35	0.811
1	918	27310	29.8	6717.2	1.48	0.856
0	944	29298	31.1	15806.86	1.65	0.910

表 2 焦平面处不同镜面开口宽度的能流参数

Table 2 Illumination parameters at focal plane of different open widths of mirror

Open width of mirror L_2 /cm	Direct radiation $D /(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	Average illumination value $\mu /(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	Relative average illumination value μ_{rel}	Nonuniformity S_0	Peak deviation degree L	Illumination utilization ratio τ
157	1024	32059	31.3	16374.13	1.68	0.910
141.5	1019	29986	29.5	15856.36	1.74	0.934
126	1048	26109	25.0	14867.83	1.94	0.947
110.5	1061	23979	22.6	13671.34	2.02	0.953
95	1032	19316	18.7	12393.62	2.15	0.966
79.5	998	15760	15.8	10734.42	2.20	0.969
64	1001	10711	10.7	8962.78	2.27	0.978

4.2 不同聚光条件下背接触电池阵列的性能输出

在非聚光条件下,总辐射 $G=884 \text{ W/m}^2$ 时,测得电池阵列的输出特性为:开路电压 $V_{oc}=3.772 \text{ V}$,短路电流 $I_{sc}=0.155 \text{ A}$,填充因子 $R_{FF}=68.0\%$,最大功率点 $P_m=0.39675 \text{ W}$,电池阵列的效率 $\eta=18.70\%$ 。

图 4(a)~(d) 分别为离焦平面 3, 2, 1 cm 和焦平面处能流分布条件下实验测得的背接触电池阵列 $I-V$ 曲线以及模拟曲线。模拟曲线首先通过对 (8) 式中双指数采用级数展开,然后合并获得幂级数多项式,再通过实验所测 $I-V$ 曲线与所得幂级数多项式进行拟合获得相关系数。理论计算与实验测量吻合较好,图 4(a)~(d) 中理论曲线与实验曲线的误差分别为 7.43%, 6.87%, 6.34% 和 5.67%, 误差由拟合误差和测量误差两部分组成,拟合误差来源于

指数展开时产生的误差和计算方法误差,此误差可通过进一步优化计算方法来减小,但无法消除;测量误差是由实验环境与实验仪器精度决定的,通过多次测量可减小,此误差不可避免。由图 4 可知,离焦面不同距离条件下背接触电池阵列的 $I-V$ 特性曲线变化不大,趋于一条直线,主要是因为聚光后电流相较不聚光时电流增长了数十倍,而电池阵列的串联电阻较大,由拟合结果可知在 0.31Ω 左右,从而使得由电池内阻以及电线电阻、接触电阻等产生的欧姆损失变大,填充因子减小,电池阵列的转换效率较不聚光时下降很多。此外,由 (8) 式可知,SRH 复合和表面复合会随输出电流的增大而增大,从而使得电池阵列输出电流减小。

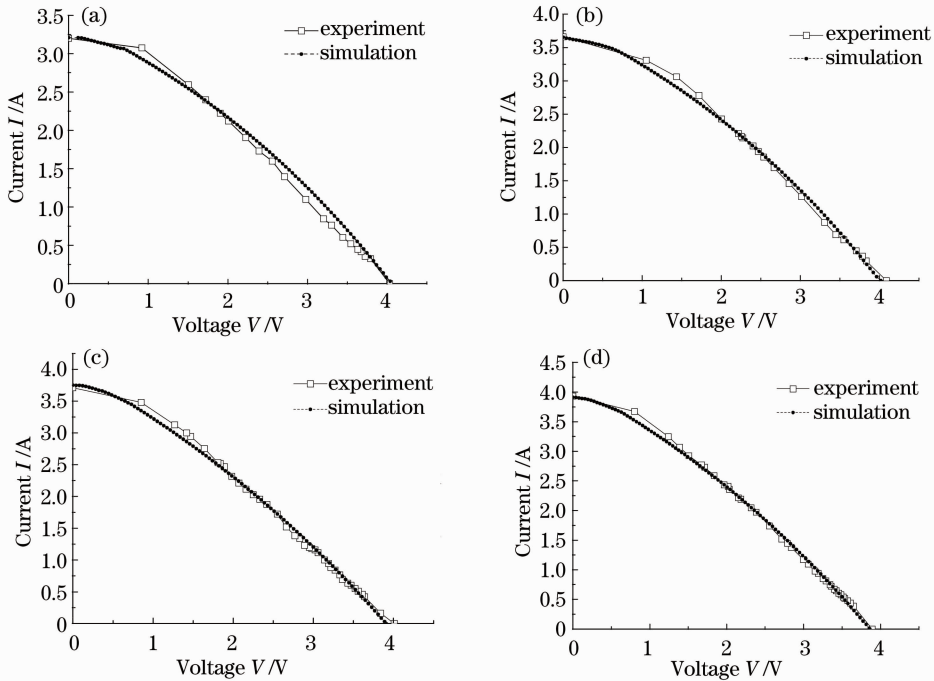


图 4 离焦平面不同距离条件下背接触电池阵列的 $I-V$ 曲线。(a) 3 cm, $D=914 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; (b) 2 cm, $D=943 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; (c) 1 cm, $D=901 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; (d) 0, $D=907 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

Fig. 4 $I-V$ curves of back contact solar cell array at different distances from focal plane. (a) 3 cm, $D=914 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; (b) 2 cm, $D=943 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; (c) 1 cm, $D=901 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; (d) 0, $D=907 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

通过 $I-V$ 曲线的实验测量,计算可得不同聚光条件下背接触电池阵列的性能参数。所得背接触电池阵列的输出性能参数如表 3 和表 4 所示。

4.3 能流参数对背接触电池阵列输出性能的影响

为研究能流参数对背接触电池阵列输出性能的影响,分析了不同距离条件下能流参数与相应电池阵列输出性能参数的关系(如图 5 所示)以及不同镜面开口宽度焦平面能流参数与相应电池阵列输出性能参数的关系(如图 6 所示)。

如图 5(a) 所示,当距离从 3 cm 变为 0 时, μ_{rel} , I_{sc} 和 $10^3 P_m/D$ 都会增大, μ_{rel} 从 25.0 增加到 31.1, 增加了 24.4%, I_{sc} 从 3.2 A 增加到 3.93 A, 增加了 22.9%。 I_{sc} 的增长率小于 μ_{rel} 的增长率,说明当能流密度增大时,背接触电池内部的复合机制增强[见 (8) 式]。 $10^3 P_m/D$ 从离焦平面 3 cm 变到 0 时增加了 15.3%。可以看出相对最大功率 $10^3 P_m/D$ 的增长率远小于相对平均能流值 μ_{rel} 的增长率,主要是由于随着阵列输出电流的增大,电池内部串联电

表 3 距焦平面不同距离条件下背接触电池阵列性能参数

Table 3 Performance parameters of back contact solar cell array of different distances from focal plane

Distance from focal plane d / cm	Direct radiation D / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	Peak temperature of cell T / $^{\circ}\text{C}$	Open circuit voltage V_{oc} / V	Short circuit current I_{sc} / A	Fill factor R_{FF}	Maximum power P_m / W	Relative maximum power $10^3 P_m / D$	Cell efficiency η / %
3	914	69.8	4.05	3.20	0.330	4.26	4.66	5.11
2	943	76.2	4.09	3.66	0.328	4.90	5.20	4.27
1	901	77.3	4.01	3.71	0.314	4.67	5.18	4.04
0	907	81.6	3.89	3.93	0.319	4.87	5.37	3.94

表 4 不同镜面开口宽度下的电池性能参数

Table 4 Performance parameters of back contact solar cell array at focal planes of different open widths of mirror

Open width of mirror L_2 / cm	Direct radiation D / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	Peak temperature of cell T / $^{\circ}\text{C}$	Open circuit voltage V_{oc} / V	Short circuit current I_{sc} / A	Fill factor R_{FF}	Maximum power P_m / W	Relative maximum power $10^3 P_m / D$	Cell efficiency η / %
157	1038	83.1	3.89	4.02	0.315	4.87	4.69	3.44
141.5	1045	80.4	3.92	3.79	0.317	4.55	4.40	3.48
126	1022	76.4	4.01	3.34	0.317	4.10	3.93	3.58
110.5	1034	71.6	4.09	2.86	0.336	3.93	3.80	3.89
95	1047	66.8	4.06	2.42	0.373	3.66	3.50	4.18
79.5	1044	55.8	4.16	2.05	0.406	3.46	3.32	4.83
64	1031	46.2	4.05	1.49	0.493	2.97	2.88	5.35

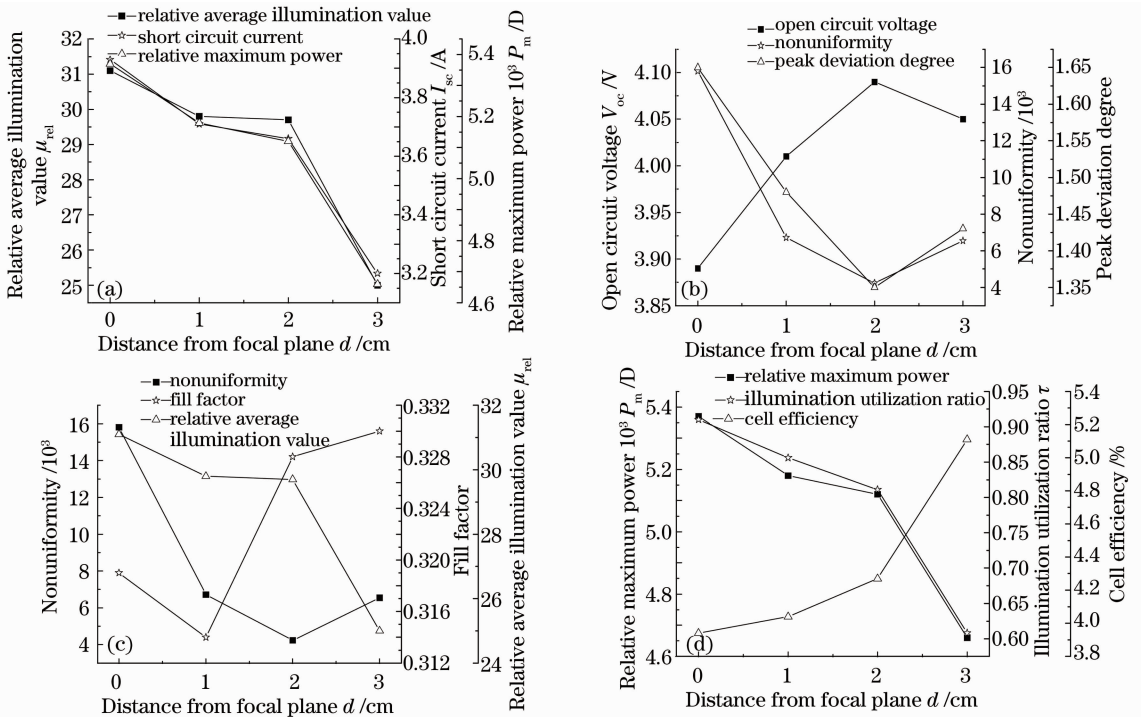


图 5 距离平面不同距离条件下能流参数与背接触电池阵列输出特性的关系。(a) μ_{rel} 与 I_{sc} , $10^3 P_m / D$;

(b) S_0, L 与 V_{oc} ; (c) μ_{rel} , S_0 与 R_{FF} ; (d) τ 与 η , $10^3 P_m / D$

Fig. 5 Relation between illumination parameters at different distances from focal plane and output characteristics of back contact solar cell array. (a) μ_{rel} and I_{sc} , $10^3 P_m / D$; (b) S_0, L and V_{oc} ; (c) μ_{rel} , S_0 and R_{FF} ; (d) τ and η , $10^3 P_m / D$

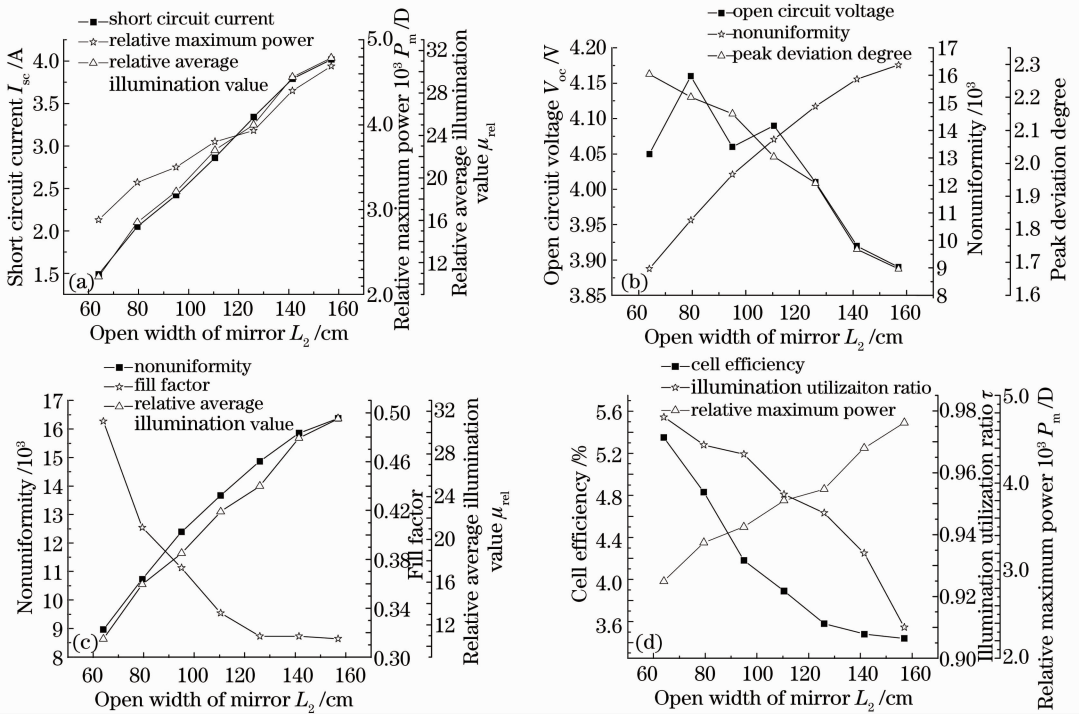


图6 不同镜面开口宽度条件下能流参数与背接触电池阵列输出特性的关系。(a) μ_{rel} 与 I_{sc} , $10^3 P_m / D$;

(b) S_0 , L 与 V_{oc} ; (c) μ_{rel} , S_0 与 R_{FF} ; (d) τ 与 η , $10^3 P_m / D$

Fig. 6 Relation between illumination parameters at different open widths of mirror and output characteristics of back contact solar cell array. (a) μ_{rel} and I_{sc} , $10^3 P_m / D$; (b) S_0 , L and V_{oc} ; (c) μ_{rel} , S_0 and R_{FF} ; (d) τ and η , $10^3 P_m / D$

阻的欧姆损失增强。

如图 5(b) 所示, d 为 2 cm 时 V_{oc} 最大, d 为 106 cm 时 V_{oc} 最小, 两电压值之差为 0.2 V, 即从离焦平面 2 cm 变为 0 时 V_{oc} 减少了 4.89%。 d 为 0 时比 d 为 2 cm 时的 S_0 增大了 11569.58, 增长 273%, 可见 S_0 越大, V_{oc} 越小。 d 为 3 cm 和 1 cm 时 V_{oc} 分别为 4.05 V 和 4.01 V, 峰值偏离度 L 分别为 1.43 和 1.48, 可见当 S_0 相当时, 峰值偏离度 L 越小, V_{oc} 越大。

如图 5(c) 所示, 填充因子随着距离从 3 cm 变到 0 呈递减趋势, 减小了 3.34%。 这是因为 $10^3 P_m / D$ 从 d 为 3 cm 变到 0 增大 15.3%, V_{oc} 随 S_0 而变化, 从 d 为 3 cm 变到 0 减小了 3.48%, I_{sc} 随 μ_{rel} 而变化, 随着距离从 3 cm 变到 0 呈增大趋势, 增大了 22.9%, I_{sc} 增大的程度大于 $10^3 P_m / D$ 增大的程度和 V_{oc} 减小的程度。 由填充因子定义可知, 填充因子会随 I_{sc} 的增大而减小。

如图 5(d) 所示, 当距离从 3 cm 变到 0 时, η 减小了 22.9%。 这是因为 $10^3 P_m / D$ 从离焦平面 3 cm 变到 0 增加了 15.3%, 而 τ 从离焦平面 3 cm 变到 0 增加了 49.8%, 可见随着距离从 3 cm 变到 0, P_m 的增长率远小于平均能流 μ 和能流利用率 τ 的增长率, 由 η 定义可知, η 会减小。

综合以上分析可得, 随着距离从 3 cm 变到 0, μ_{rel} 增大了 24.4%, I_{sc} 和 $10^3 P_m / D$ 分别增大了 22.9%、15.3%。 S_0 和 L 在距离为 2 cm 时最小, 此时, V_{oc} 最大, V_{oc} 、填充因子和 η 较焦平面时分别提高了 5.14%、2.82% 和 8.38%, $10^3 P_m / D$ 较焦平面时减小了 3.16%。 可见, 距离为 2 cm 时, 电池阵列输出性能较其他距离好, 因此, 距离为 2 cm 的能流密度分布最适宜背接触电池阵列。

如图 6(a) 所示, μ_{rel} , I_{sc} 和 $10^3 P_m / D$ 都随 L_2 减小而减小。 L_2 从 157 cm 减小到 64 cm 时, μ_{rel} 从 31.3 减小到 10.7, 下降了 65.8%, I_{sc} 由 4.02 A 减小到 1.49 A, 下降了 63.0%, I_{sc} 的降低率小于相对平均能流 μ_{rel} 的增长率, 说明当能流密度减小时, 背接触电池内部的复合机制减弱。 $10^3 P_m / D$ 在 L_2 为 157 cm 和 64 cm 时分别为 4.69 和 2.88, 从 157 cm 减小到 64 cm 降低了 38.6%。 而 μ_{rel} 降低了 65.8%, 可以看出最大功率 $10^3 P_m / D$ 的下降率远小于平均能流 μ_{rel} 的下降率, 主要是由于随着电流的减小, 电池内部串联电阻的欧姆损失减弱。

如图 6(b) 所示, L_2 从 157 cm 减小到 64 cm, S_0 逐渐减小, L 逐渐增大, V_{oc} 呈增大趋势。 当 L_2 为 157 cm 时, 开路电压 V_{oc} 最小, 此时 V_{oc} 为 3.89 V。

当 L_2 为 79.5 cm 时,开路电压 V_{oc} 最大,此时 V_{oc} 为 4.16 V,两电压差值为 0.27 V,即 L_2 从 79.5 cm 变为 157 cm, V_{oc} 减小了 6.49%。由图可知,由于 L 逐渐增大, V_{oc} 随着 L_2 从 157 cm 减小到 64 cm 的增大率逐渐减小,且 V_{oc} 受 S_0 影响强于 L 。

如图 6(c) 所示,随着 L_2 从 157 cm 减小到 64 cm, 填充因子增大了 56.5%。这是由于,当 L_2 从 157 cm 减小到 64 cm, $10^3 P_m/D$ 下降了 38.6%, V_{oc} 下降了 6.49%, I_{sc} 下降了 63.0%, 由填充因子定义可知,填充因子随 L_2 从 157 cm 变为 64 cm 会增大。

如图 6(d) 所示,当 L_2 从 157 cm 减小到 64 cm, 电池效率 η 增大了 55.5%。这是由于当 L_2 从 157 cm 减小到 64 cm, $10^3 P_m/D$ 下降了 38.6%, μ_{rel} 下降了 65.8%, τ 增加了 7.47%, 可见 $10^3 P_m/D$ 的降低程度和能流利用率 τ 的增大程度小于平均能流 μ 的降低程度,因此,电池效率 η 会相应增大。

综上所述,从镜面开口宽度 64 cm 增加到 157 cm, μ_{rel} 增大了 192.5%, I_{sc} 和 $10^3 P_m/D$ 分别增大了 169.8%、62.9%; S_0 增大了 7411.35, L 和 τ 分别减小了 26.0%、7.47%, V_{oc} 减小了 3.95%, 填充因子减小了 15.6%, η 下降了 35.7%。 $10^3 P_m/D$ 增大的程度大于填充因子, η , V_{oc} 减小的程度。可见,随着聚光器开口宽度的增大,电池阵列的综合输出性能将会提高。

5 结 论

在聚光光伏发电系统的研究中,聚光能流特性对聚光电池的性能输出有很大影响。一方面考虑聚光条件下聚光电池的内复合机制和寄生电阻的影响建立了聚光电池双指数等效电路模型,模拟结果与实验结果较好地吻合,误差在 7.5% 以内。另一方面得到能流参数与聚光硅电池阵列输出特性参数的关系:对于一定宽度的聚光电池来说,短路电流和相对最大功率随相对平均能流值的增加而增加;开路电压随不均匀度和峰值偏离度的增大而减小;相对平均能流值对填充因子影响最大;电池的效率由能流利用率和相对平均能流值决定。对于 6 片串联 2 cm × 2 cm 的背接触电池阵列,镜面开口宽度为 157 cm、离焦平面为 2 cm 的平面上的聚光能流分布最适合阵列性能的输出。

参 考 文 献

1 Hasan Baig, Keith C. Heasman, Tapas K. Mallick. Non-uniform illumination in concentrating solar cells [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, **16**(8): 5890~5909
2 P. Pérez-Higueras, E. Muñoz, G. Almonacid *et al.*. High

concentrator photovoltaics efficiencies; present status and forecast [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**(4): 1810~1815
3 M. Castro, I. Antón, G. Sala. Pilot production of concentrator silicon solar cells: approaching industrialization [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, **92**(12): 1697~1705
4 Daniel Chemisana. Building integrated concentrating photovoltaics: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**(1): 603~611
5 A. Luque, G. Sala, J. C. Arboiro. Electric and thermal model for non-uniformly illuminated concentration cells [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1998, **51**(3-4): 269~290
6 Glen Johnston. Focal region measurements of the 20 m² tiled dish at the Australian National University [J]. *Solar Energy*, 1998, **63**(2): 117~124
7 E. T. Franklin, J. S. Coventry. Effects of highly non-uniform illumination distribution on electrical performance of solar cells [C]. The 40th Annual Conference for the Australian and New Zealand Solar Energy Society, 2002
8 A. Mellor, J. L. Domenech-Garret, D. Chemisana *et al.*. A two-dimensional finite element model of front surface current flow in cells under non-uniform, concentrated illumination [J]. *Solar Energy*, 2009, **83**(9): 1459~1465
9 Domenech-Garret Juan-Luis. Cell behaviour under different non-uniform temperature and radiation combined profiles using a two dimensional finite element model [J]. *Solar Energy*, 2011, **85**(2): 256~264
10 B. Galiana, C. Algora, I. Rey-Stolle *et al.*. A 3-D model for concentrator solar cells based on distributed circuit units [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2005, **52**(12): 2552~2558
11 Andreas Mohr. Silicon Concentrator Cells in a Two-Stage Photovoltaic System with a Concentration Factor of 300 × [D]. Freiburg: Freiburg University, 2005. 27~29
12 A. Cuevas, S. López-Romero. The combined effect of non-uniform illumination and series resistance on the open-circuit voltage of solar cells [J]. *Solar Cells*, 1984, **11**(2): 163~173
13 Dai Jingmin, Liu Ying, Yu Tianhe. Development of flux density distribution measurement system based on CCD [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(11): 1507~1511
戴景民, 刘颖, 于天河. 基于 CCD 的聚焦光斑能流密度分布测量系统的研制 [J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(11): 1507~1511
14 Dai Jingmin, Liu Ying. Measurement and analysis of flux density distribution for spot focused by concentrator [J]. *J. Applied Optics*, 2008, **29**(6): 917~920
戴景民, 刘颖. 聚光器聚焦光斑能流密度分布的测量与分析 [J]. *应用光学*, 2008, **29**(6): 917~920
15 Liu Ying, Dai Jingmin, Lang Zhiguo *et al.*. Finite element analysis for flux distribution on focal plane of rotating parabolic concentrators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1775~1778
刘颖, 戴景民, 郎治国等. 旋转抛物面聚光器焦面能流分布的有限元分析 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1775~1778
16 R. J. Schwartz. Review of silicon solar cells for high concentrations [J]. *Solar Cells*, 1982, **6**(1): 17~38
17 J. S. Coventry. Performance of a concentrating photovoltaic/thermal collector [J]. *Solar Energy*, 2005, **78**(2): 211~222
18 F. Chenlo, M. Cid. A linear concentrator photovoltaic module: analysis of non-uniform illumination and temperature effects on efficiency [J]. *Solar Cells*, 1987, **20**(1): 27~39
19 R. K. Mathur, D. R. Mehrotra, S. Mittal *et al.*. Thermal non-uniformities in concentrator solar cells [J]. *Solar Cells*, 1984, **11**(2): 175~188
20 D. J. Mbewe, H. C. Card, D. C. Card. A model of silicon solar cells for concentrator photovoltaic and photovoltaic/thermal system design [J]. *Solar Energy*, 1985, **35**(3): 247~258
21 Zhigang Li, Dawei Tang, Jinglong Du *et al.*. Study on the radiation flux and temperature distributions of the concentrator-receiver system in a solar dish/stirling power facility [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, **31**(10): 1780~1789