

光学学报

直漏斗二次聚光对单光谱氙灯-热光伏系统性能的影响分析

柳秀丽, 陈学*, 孙创, 夏新林

哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 设计了一种热光伏电池单光谱辐射能-电能转换特性的测试系统。通过带通型滤波片和直漏斗二次聚光器实现了氙灯与电池间单光谱、能流密度可调的定向辐射传输。基于蒙特卡罗射线追迹法, 构建了氙灯-热光伏测试系统的光谱辐射传输模型, 分析了电池表面辐射能流的分布特征, 讨论了二次聚光器开口尺寸和高度的影响规律, 并从理论上计算了 GaSb 电池在单光谱、高能流辐射下的电流-电压曲线、输出功率和热电转换效率。结果表明, 直漏斗二次聚光器的引入有效提高了热光伏电池的热电转换性能, 电池表面辐射能量提高了 105.3%, 且均匀度高达 95%, 电池的输出功率提高了 109.1%。

关键词 几何光学; 热光伏系统; 二次聚光器; 热电转换; 蒙特卡罗法

中图分类号 O435

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1508001

Effect of Secondary Concentrator with Straight Funnel on Performance of Single-Spectrum Xenon Lamp-Thermophotovoltaic System

Liu Xiuli, Chen Xue*, Sun Chuang, Xia Xinlin

School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China

Abstract A test system is designed for evaluating the characteristics of single-spectrum radiant energy-electricity energy conversion of thermophotovoltaic cells. A band-pass filter and a secondary concentrator with a straight funnel are used to achieve single-spectrum and directional radiation transmission between the xenon lamp and the thermophotovoltaic cells with adjustable energy flux density. Based on Monte-Carlo ray tracing method, the spectral radiation transmission model of the xenon lamp-thermophotovoltaic test system is constructed. The distribution characteristics of radiant energy flux on the cell surface are analyzed, and the effects of opening size and height of the secondary concentrator are discussed. Meanwhile, the current-voltage curve, output power, and thermoelectric conversion efficiency of GaSb cell under single-spectrum and high energy flux radiation are theoretically calculated. The results show that the introduction of a secondary concentrator can effectively improve the thermoelectric conversion performance of the thermophotovoltaic cells. The radiant energy on the cell surface increases by 105.3%, with the uniformity reaching 95%, and the output power of the cell increases by 109.1%.

Key words geometric optics; thermophotovoltaic system; secondary concentrator; thermoelectric conversion; Monte Carlo method

1 引言

热光伏发电是将高温热辐射能通过半导体电池的 PN 结直接转换成电能的一种热电转换技术^[1]。热光伏发电系统具有结构简单、体积小、质量轻、噪声低和可靠性高等优点^[2], 并且转换过程清洁无污染, 进而被

视为未来极具发展潜力的热电转换技术之一^[3]。影响热光伏系统热电转换性能的因素较多, 主要包括辐照强度^[4]、光谱调控^[5]、辐射均匀性^[6-7]和热光伏电池的工作温度^[8-9]等。其中, 光谱调控是影响热电转换效率的一个关键因素。热光伏电池受制于光谱响应度和截止波长, 响应波段外的能量会被转换成热能, 使电池的温

收稿日期: 2022-01-11; 修回日期: 2022-02-07; 录用日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(51806046)、黑龙江省博士后资助(LBH-Z18081)

通信作者: hit_chenxue@hit.edu.cn

度升高,降低电池的工作性能,缩短其使用寿命。为了提高热光伏系统的热电转换性能,需要对到达电池表面的光谱辐射能量特性开展充分的研究。

通过调控光谱与辐射能流密度来提高热光伏电池的热电转换效率,是目前该领域的热点和难点。Zhang 等^[10]将光学选择性空腔加入热光伏系统中,通过测试热辐射与热光伏电池之间的光电转换效率,有效提升了系统的辐射均匀性,减少了光谱失配。Zhang 等^[11]通过改变热源的温度,测试了辐射能流密度大小对热光伏电池输出电能的影响。Sametoglu 等^[12]设计了针对多结热光伏电池在不同光谱辐照下光谱响应的测试系统,结果表明,不同光谱下多结热光伏电池的光谱响应度差异明显。另外,在太阳能光伏领域:时强等^[13]利用单色仪调制出单色光谱,探究了太阳能电池(Si)在不同光谱下的光电转换性能;Mellor 等^[14]通过实验测试证明了电池的发电效率会随着光照不均匀程度的升高而下降;Khvostikov 等^[15]研究了光伏电池(Ge)在不同太阳光聚光比(改变辐射能流密度)下的光电转换效率;张献逢等^[16]采用三光栅单色仪测试了光伏电池(GaInP/GaAs/Ge)在 350~1900 nm 波段内的光谱响应特性,并利用石英光锥提高了单光谱的辐射强度。

上述研究只对单光谱、能流密度和辐射均匀性中的单一因素进行了分析,对三者的综合影响还缺乏深入讨论,且大部分集中在对太阳能光伏的研究,对热光

伏技术的研究较少。为了更好地探究高能流、单光谱辐射能量对热光伏电池性能的影响,本文设计了单光谱氙灯-热光伏测试系统,引入一种直漏斗二次聚光器实现了高能流、单光谱的辐射条件。采用蒙特卡罗射线追迹法研究了二次聚光器开口尺寸和高度对热光伏电池表面的入射辐射能流密度及其分布的影响,并根据匀光后的平均辐照度,对热光伏电池的热-电转换性能进行了预测和分析。

2 单光谱氙灯-热光伏测试系统设计

热光伏单光谱辐射能-电能转换特性的测试系统主要由氙灯、椭球面聚光镜、带通型滤波片、直漏斗二次聚光器和热光伏电池等组成,光谱辐射能量传递过程如图 1 所示。采用常州玉宇光电器件有限公司生产的型号为 XHA70000-STAGE 的短弧氙灯作为高能流辐射源,并置于椭球聚光镜的第一焦点 F_1 处,通过氙灯上的椭球面聚光镜进行第一次能量会聚,提高辐射能流密度,相对光谱能量分布如图 2 所示(由常州玉宇光电器件有限公司提供)。带通型滤波片与椭球面聚光镜的第二焦点 F_2 所在的平面重合,对会聚到第二焦平面的宽光谱能量进行光谱调控,形成带宽为 100 nm 的窄谱带入射光。然后,利用直漏斗二次聚光器进行二次聚光,形成一个辐照度可调、能流密度高且均匀性好的光斑在该光斑照射到热光伏电池表面后,通过热光伏电池将辐射能转换为电能。

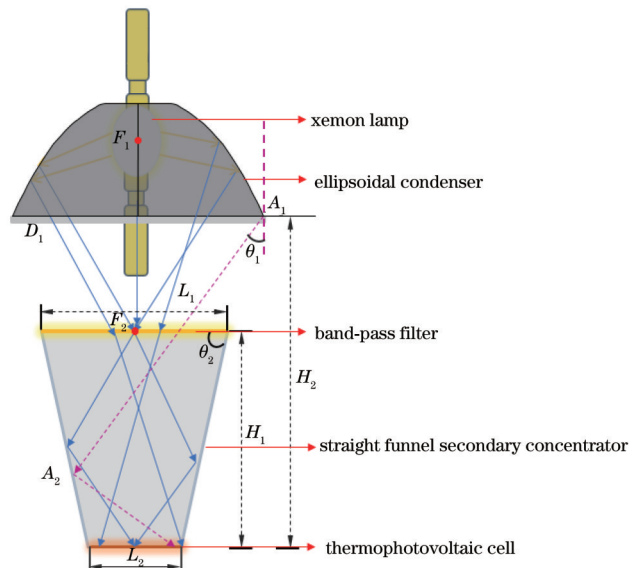


图 1 单光谱氙灯-热光伏测试系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of single spectrum xenon lamp-thermophotovoltaic system

在实际设计中,直漏斗二次聚光器的侧壁在反射光线的同时会吸收部分能量。为了减少光线多次反射而造成的能量损失,直漏斗的设计需尽量使光线只经过一次反射即可到达热光伏电池表面。图 1 中的短弧球形氙灯直径为 90 mm,外层椭球面聚光镜的开口直径 D_1 为 365 mm、焦距为 $L_{F_1, F_2} = 800$ mm,边缘角为 $\theta_1 = 13^\circ$ 。正方形滤波片边长为 L_1 ,直漏斗二次聚光器

下表面根据热光伏电池尺寸取 $L_2 = 16.5$ mm。二次聚光器的高度 H_1 、开口 θ_2 和上下开口尺寸 (L_1 与 L_2) 满足的关系式^[17]为

$$\tan \theta_2 = \frac{2H_1}{L_1 - L_2} \quad (1)$$

氙灯发出的光线经过椭球面聚光镜反射后,全部入射到二次聚光器的顶部开口处,需满足的条件^[18]为

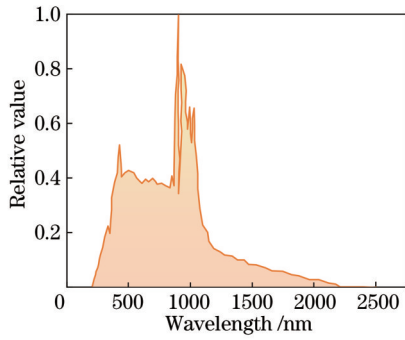


图 2 氙灯光谱能量分布图

Fig. 2 Spectral energy distribution of xenon lamp

$$H_2 \cdot \tan \theta_1 + H_1 \cdot \left(\frac{\sqrt{2} D_1}{2H_2} - \tan \theta_1 \right) \leq \frac{L_1}{2} \leq \frac{\sqrt{2} D_1}{2} \quad (2)$$

若要椭球面聚光镜所有出射光线进入直漏斗聚光器中且仅发生一次反射后就到达热光伏电池表面处,则需要满足的条件为

$$\frac{\pi}{2} - \arctan \left(\tan \theta_1 + \frac{\sqrt{2} D_1}{2H_2} \right) \leq \theta_2, \quad (3)$$

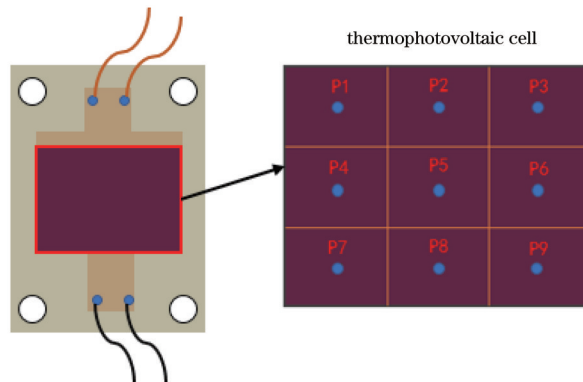


图 3 热光伏电池表面等分图

Fig. 3 Surface area division diagram of thermophotovoltaic cell

3 测试系统中直漏斗二次聚光器的设计分析

本文选择带宽在 1.1~1.2 μm 的单色光中进行分析,椭球面聚光镜反射率为 1.0,带通型滤波片透过率为 0.95,直漏斗二次聚光器反射率为 0.95。直漏斗二次聚光器的开口和高度是影响到达热光伏电池表面能流密度和光斑均匀性的关键参数。为了更好地探究二者对单光谱氙灯-热光伏系统的影响,通过 TracePro 仿真软件进行如图 4 所示的光路模拟,氙灯的电功率为 6 kW,实测光功率为 2.78 kW,设置追踪的光线数为 10⁷ 条。

3.1 直漏斗二次聚光器的开口影响分析

直漏斗二次聚光器的初始高度 H_1 分别取 40, 50, 60 mm。根据式 (1)~(4) 初步确定开口尺寸范围为

$$\frac{\sin \left[\arccot \left(\tan \theta_1 + \frac{\sqrt{2} D_1}{2H_2} \right) \right] \cdot \left(H_2 \cdot \tan \theta_1 - \frac{L_2}{2} \right)}{\sin \left[2\theta_2 + \arccot \left(\tan \theta_1 + \frac{\sqrt{2} D_1}{2H_2} \right) - \pi \right]} \leq L_2, \quad (4)$$

式中: H_2 为椭球面聚光镜与电池间的距离。根据已知的 D_1, L_2, θ_1 和 $H_2 - H_1$ 的值,根据式 (1)~(4),可以选取满足条件的二次聚光器参数(高度、开口、倾角)。根据美国 ANSI/NAPMITS 7.228-1997 标准的规定^[19],辐照均匀度^[20-21]的表达式为

$$\delta = \left[1 - \frac{\max(|E_i - E_a|)}{E_a} \right] \times 100\%, \quad (5)$$

式中: E_i 为 i 区域内能流密度的平均值; $E_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i$ 为整个区域的平均能流密度,其中 n 为接收有效辐射区域的划分单元数; $\max(\cdot)$ 为取最大值函数。本文将最终接收辐射的热光伏电池表面分成面积相等的 9 个区域(P1~P9),如图 3 所示。

25~60 mm,每间隔 5 mm 取值改变直漏斗二次聚光器的上开口尺寸。利用 TracePro 软件进行仿真模拟,获取热光伏电池在不同聚集器开口尺寸下的入射能量变化,如图 5 所示。可以看出,当直漏斗二次聚光器高度一定时,随着开口的增大,热光伏电池表面接收到的能量值呈先上升后下降的趋势。入射进直漏斗的光线一部分会发生多次反射,造成能量损失。随着聚光器开口尺寸的进一步增大,倾角 θ_2 变大,直接反射出直漏斗的光线增多,大部分光线不能到达电池表面。可以看出,无论高度为多少,热光伏电池表面接收到的能量都是在开口尺寸为 $L_1 = 35$ mm 时达到峰值,且在高度为 50 mm 时能量达到最大值(130.92 W),此时系统的波段传输效率为 27.71%。

图 6 展示了聚光器的不同开口尺寸对电池表面的辐射均匀度的影响。结果表明,当高度一定时,不同的

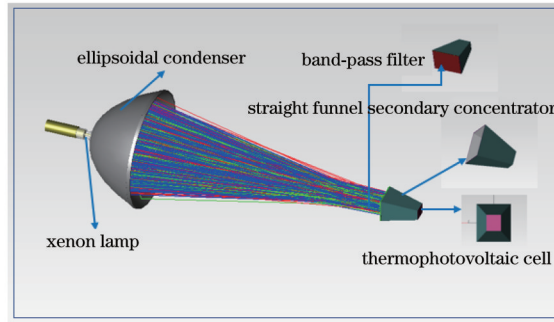


图 4 系统光路模拟图

Fig. 4 Simulation diagram of system optical path

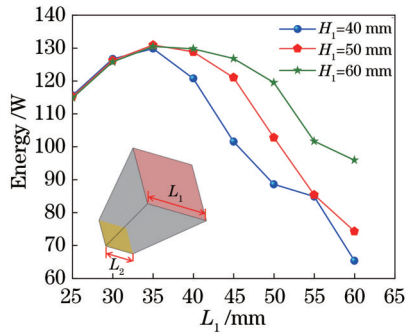


图 5 聚集器不同开口尺寸下电池表面的能量变化

Fig. 5 Variation of received energy on battery surface under different opening sizes of aggregator

开口尺寸会使均匀度的值波动较大(近 15%)。当直漏斗二次聚光器的高度为 50 mm, 开口尺寸为 30 mm 时, 辐射均匀度最高, 达到了 98.08%, 远高于其他开口尺寸时的均匀度。由此可见, 聚光器开口的变化改变了光线传输过程, 最终影响了照射到电池表面的能量分布。

综合图 5 中的能量和图 6 中的均匀度数据来看, 当取直漏斗二次聚光器开口为 $L_1=35$ mm 时, 即 $\theta_2=$

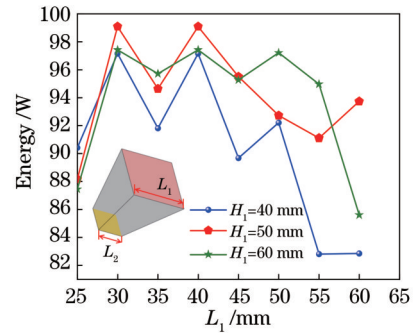


图 6 聚光器开口尺寸不同时电池表面的辐射均匀度

Fig. 6 Radiation uniformity of battery surface under different opening sizes of aggregator

10.5°, 可以满足高能流密度的要求。图 7 展示了 $H_1=50$ mm、 $L_1=35$ mm 和 $H_1=50$ mm、 $L_1=60$ mm 两种情况下热光伏电池表面的能流密度(q)分布图。可以看出, 在高度保持一致的情况下, 当 $L_1=35$ mm 时, 电池表面接收到的能量为 130.92 W, 而当 $L_1=60$ mm 时, 电池表面接收到的能量仅有 74.31 W, 前者是后者的 1.76 倍, 即开口尺寸的不同会使热光伏电池表面的能量分布出现明显差异。

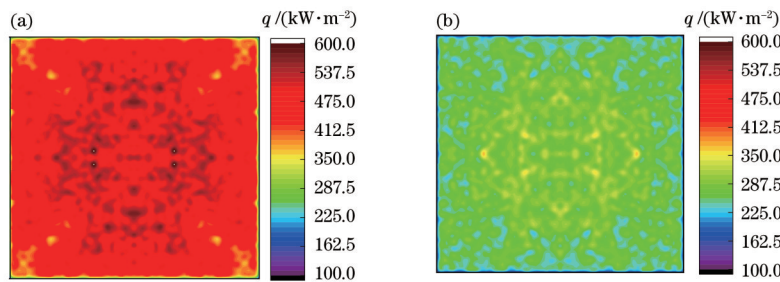


图 7 聚光器不同开口尺寸下的能流密度分布图。(a) $H_1=50$ mm, $L_1=35$ mm; (b) $H_1=50$ mm, $L_1=60$ mm

Fig. 7 Energy flux density distribution under different opening sizes of aggregator. (a) $H_1=50$ mm, $L_1=35$ mm; (b) $H_1=50$ mm, $L_1=60$ mm

3.2 直漏斗二次聚光器的高度影响分析

根据 3.1 中计算分析的结果, 取直漏斗二次聚光器的上表面边长为 $L_1=35$ mm, 下表面边长取 $L_2=16.5$ mm, 即保持开口不变, 探究高度的影响规律。初步取高度 H_1 在 30~100 mm 之间, 每间隔 10 mm 取一个值, 利用 TracePro 软件进行光路模拟计算, 获取直

漏斗在不同高度下热光伏电池表面的能量分布, 如图 8(a) 所示。可以看出, 热光伏电池表面接收到的能量值和均匀度随着 H_1 的增加呈现先增大后减小的趋势, 在 $H_1=50$ mm 左右出现峰值。因此, 取 H_1 在 40~60 mm 之间, 以 1 mm 为间隔, 进一步寻找 H_1 的优值。从图 8(b) 可以看出: 当高度 H_1 小于 50 mm 时, 能量值

和均匀度都随着高度的增加而增加;当高度 H_1 大于 50 mm 时,能量值减少,但均匀度是增加的,二者呈负

相关。考虑到二者的综合效应,选取 $H_1=53$ mm,以确保能量较高且均匀度在 95% 以上。

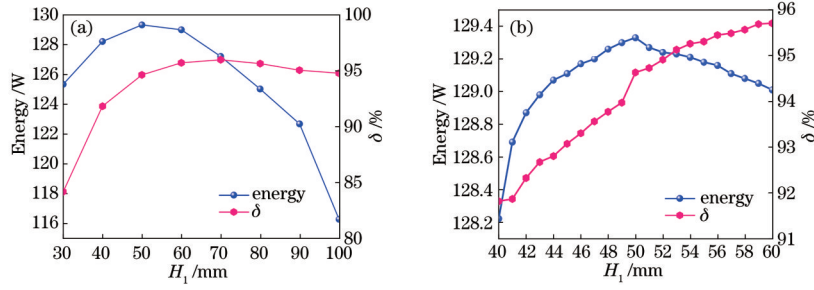


图 8 辐射能量和均匀度随聚集器高度 H_1 的变化。(a) 30~100 mm; (b) 40~60 mm

Fig. 8 Radiation energy and uniformity varying with aggregator height H_1 . (a) 30~100 mm; (b) 40~60 mm

图 9 给出了无直漏斗二次聚光器和直漏斗二次聚光器在 $H_1=53$ mm、 $L_1=35$ mm、 $L_2=16.5$ mm 时的热光伏电池表面能流密度分布图,无直漏斗时热光伏电池的位置与有直漏斗时的位置相同。通过两图的对比可以看出,在没有直漏斗二次聚光器时,电池表面可接

收的能量仅为 63.76 W,直漏斗的加入使电池表面可接收的能量提高至 130.92 W,极大地提高了到达热光伏电池表面的总能量(105.3%),且均匀度由 83.12% 提高至 95.13%,效果提升显著。

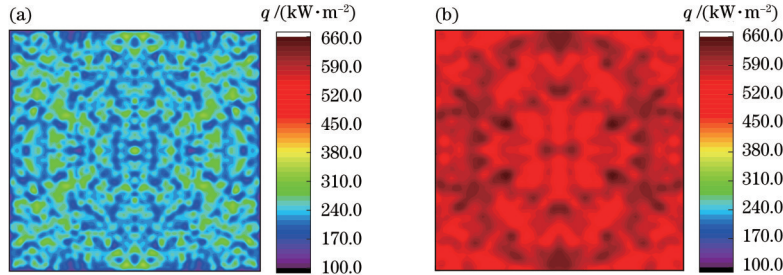


图 9 热光伏电池表面能流密度分布图。(a) 无直漏斗二次聚光器; (b) 添加直漏斗二次聚光器

Fig. 9 Surface energy flux density of thermophotovoltaic cell. (a) Without straight funnel secondary concentrator; (b) adding straight funnel secondary concentrator

4 热电转换效率

以美国 JX Crystal 公司生产的 GaSb 热光伏电池为例,尺寸为 16.31 mm × 14.64 mm,为了计算方便仍以 $L_2=16.5$ mm 作为 GaSb 电池的边长。GaSb 电池在不同波长下的量子效率如图 10 所示(由美国 JX 公司提供)。基于理想二极管热电转换模型,将热光伏电池与负载电阻接成通路,向外输出的电流(I)和电压(V)的表达式为

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{eE_{g0} \cdot (1/T_n - 1/T)}{n \cdot K}\right], \quad (8)$$

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T}\right) - 1}, \quad (9)$$

式中: T_n 为标准电池温度,其值为 25 °C; E_{g0} 为带隙能,其值为 1.72 eV; I_{rs} 为反向饱和电流; V_{oc} 为开路电压。

通过并联测量元件的电流的表达式为

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (10)$$

式中: R_{sh} 为并联元件电阻。

式中: N_s 为连接的电池数,其值为 1; T 为电池温度; I_{sh} 为通过并联测量元件的电流; n 为二极管的理想因数; R_s 为串联元件电阻; I_0 为饱和电流; e 为电荷量; K 为玻尔兹曼常数; I_{ph} 为光电流,其表达式为

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{e \cdot (V + IR_s)}{nKN_s T}\right] \right\} - I_{sh}, \quad (6)$$

$$I_{ph} = \left[I_{sc} + k_i(T - 298) \right] \cdot \frac{q}{1000}, \quad (7)$$

式中: I_{sc} 为短路电流; k 为温度系数,其值为 0.0032^[21]。

饱和电流的计算公式为

依据第 3 节计算分析的结果,通过式(7)~(10)计算相应辐照条件下电池输出的 I - V 曲线。从图 11 中可以看出:热光伏电池在直漏斗二次聚光器的聚光作用下,经过滤波后到达热光伏电池表面的能量为 130.92 W,输出的最大功率为 0.023 W/cm²;在不含二次聚光器的情况下,到达热光伏电池表面的能量为 63.76 W,输出的最大功率为 0.011 W/cm²。二者相比较,能量提升了 105.3%,输出功率提升了 109.1%,证明二次聚光器的加入对热电转化效率的提升效果显

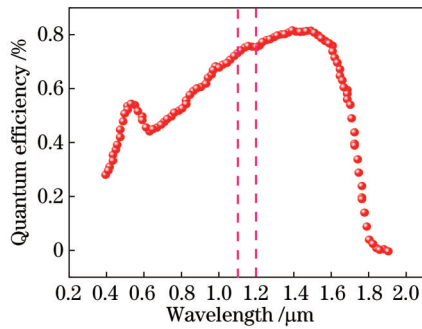
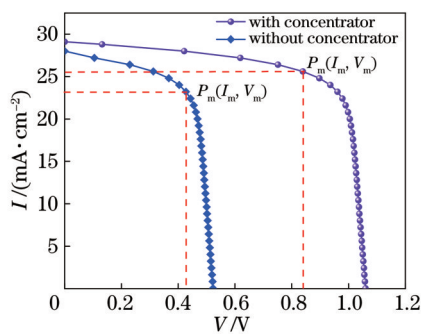


图 10 JX Crystal GaSb 电池的量子效率图

Fig. 10 Quantum efficiency diagram of JX Crystal GaSb cell

著。图 11 中 P_m 、 I_m 和 V_m 分别为最大输出功率、最大输出电流和最大输出电压。

图 11 有/无聚光元件时热光伏电池输出的 I - V 曲线Fig. 11 I - V curve of thermophotovoltaic cell output with or without concentrator

5 结 论

设计了一种直漏斗二次聚光下单光谱氙灯-热光伏测试系统实验台,引入直漏斗二次聚光器,改变到达热光伏电池表面的辐射能流密度和均匀性。同时,利用理想二极管光电转换模型计算了二次聚光器在对应尺寸、特定波长辐射下热光伏电池输出的 I - V 曲线。通过对比分析结果,可以发现:直漏斗二次聚光下单光谱氙灯-热光伏系统实验台可以测试不同热光伏电池在不同单光谱、高能流辐射下的热电转换效率,并且可以提高电池表面能流密度的均匀性;随着直漏斗二次聚光器开口尺寸和高度的增大,热光伏电池表面接收到的能量值先增大后减小;开口尺寸的变化对均匀性影响较大,而高度增大时,均匀性逐渐增大并且趋于平缓。确定聚光器最优参数组合为高度为 53 mm、开口尺寸为 35 mm。与未采用二次聚光器的热光伏测试系统相比,所提系统中到达电池的能量提升了 105.3%,且均匀度在 95% 以上,GaSb 电池的最大输出功率提高了 109.1%。

参 考 文 献

[1] Nelson R E. A brief history of thermophotovoltaic development[J]. Semiconductor Science and

Technology, 2003, 18(5): S141-S143.

- [2] Mustafa K F, Abdullah S, Abdullah M Z, et al. A review of combustion-driven thermoelectric (TE) and thermophotovoltaic (TPV) power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 71: 572-584.
- [3] 董丹, 秦红, 刘重裕, 等. 太阳能光伏/热(PV/T)技术的研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(5): 1020-1024.
- Dong D, Qin H, Liu C Y, et al. Research progress in solar photovoltaic/thermal (PV/T) technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(5): 1020-1024.
- [4] 胡金萍, 李强. 聚光光斑的均匀性对硅太阳电池性能影响的理论研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 23-28.
- Hu J P, Li Q. Theoretical research of uniformity of light spot influence on performance of concentrating silicon cells[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(10): 23-28.
- [5] 汪洋. 基于微纳结构的光谱调控及其在太阳能热光伏中的应用[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- Wang Y. Spectrum regulation based on micro nano structure and its application in solar thermal photovoltaic [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [6] Wang C L, Gong J H, Yan J J, et al. Theoretical and experimental study on the uniformity of reflective high concentration photovoltaic system with light funnel[J]. Renewable Energy, 2019, 133: 893-900.
- [7] 颜健, 聂笃忠, 田勇, 等. 基于凹面透镜优化的太阳能碟式/腔体接收器系统聚焦能流均匀化研究[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1022001.
- Yan J, Nie D Z, Tian Y, et al. Optimal design of concave lens for flux homogenization of solar dish/cavity collector system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1022001.
- [8] Singh P, Ravindra N M. Temperature dependence of solar cell performance: an analysis[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012, 101: 36-45.
- [9] Singh P, Singh S N, Lal M, et al. Temperature dependence of I - V characteristics and performance parameters of silicon solar cell[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2008, 92(12): 1611-1616.
- [10] Zhang C, Tang L L, Liu Y, et al. A novel thermophotovoltaic optical cavity for improved irradiance uniformity and system performance[J]. Energy, 2020, 195: 116962.
- [11] Zhang C, Liao Z H, Tang L L, et al. A comparatively experimental study on the temperature-dependent performance of thermophotovoltaic cells[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(19): 193902.
- [12] Sametoglu F, Celikel O, Witt F. A differential spectral responsivity measurement system constructed for determining of the spectral responsivity of a single- and triple-junction photovoltaic cells[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2017, 80(2): 21001. [LinkOut]
- [13] 时强, 张雅婷, 余友林, 等. 硅异质结太阳电池的电学性能测试研究[J]. 信息技术与标准化, 2020(9): 49-53.
- Shi Q, Zhang Y T, Yu Y L, et al. Research on electrical

- performance measurement of silicon heterojunction solar cells[J]. *Information Technology & Standardization*, 2020 (9): 49-53.
- [14] Mellor A, Domenech-Garret J L, Chemisana D, 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.
- [15] Khvostikov V P, Khvostikova O A, Gazaryan P Y, et al. Photovoltaic cells based on GaSb and Ge for solar and thermophotovoltaic applications[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2007, 129(3): 291-297.
- [16] 张献逢. 多结太阳能电池光谱响应测试系统中光学系统研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
Zhang X F. Research on optical system in multi junction solar cell spectral response test system[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2007.
- [17] 茹占强, 安志勇, 宋贺伦, 等. 应用于聚光光伏模组的全反射式二次聚光器的设计与性能分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(2): 262-266.
Ru Z Q, An Z Y, Song H L, et al. Design and performance analysis of total reflection-type secondary optics in concentrated photovoltaic module[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 262-266.
- [18] 杨光辉, 刘友强, 尧舜, 等. 聚光模组二次光学元件优化设计与研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0322006.
Yang G H, Liu Y Q, Yao S, et al. Optimized design and research of secondary optics in concentrating photovoltaic module[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0322006.
- [19] Gong J H, Wang C L, Gong C Y, et al. Study on the uniformity of high concentration photovoltaic system with array algorithm[J]. *Solar Energy*, 2017, 153: 181-187.
- [20] Abo-Zahhad E M, Ookawara S, Radwan A, et al. Numerical analyses of hybrid jet impingement/microchannel cooling device for thermal management of high concentrator triple-junction solar cell[J]. *Applied Energy*, 2019, 253: 113538.
- [21] 颜健, 彭佑多, 程自然. 可实现均匀能流分布的太阳能碟式/三角形腔体接收系统的光学特性研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(7): 202-213.
Yan J, Peng Y D, Cheng Z R. Optical characteristics of solar dish concentrator/triangular cavity receive system with uniform flux distribution[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(7): 202-213.