

文章编号: 0254-0096(2010)09-1154-07

聚光太阳能热电系统的实验研究

王六玲¹, 徐永锋², 李明², 项明², 王云峰², 林文贤², 魏生贤²

(1. 云南师范大学物理与电子信息学院, 昆明 650092;

2. 云南师范大学可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室, 昆明 650092)

摘要: 利用所设计的 2m² 槽式聚光热电联供系统, 对晶硅阵列和砷化镓电池阵列进行性能测试实验, 结果表明: 砷化镓电池阵列的聚光特性优于晶硅电池阵列。优选出一定聚光比作用下性能较好的砷化镓电池阵列建立 10m² 槽式太阳能聚光热电系统, 实验表明: 10m² 系统的电池阵列电效率为 23.21%, 系统光电效率和光热效率分别为 9.88% 和 49.84%, 系统焓效率为 13.48%, 比基于槽式聚光加热真空管系统焓效率高 158%, 比平板光伏发电系统焓效率高 16%。对采用空间太阳电池阵列的 10m² 聚光热电系统性能分析表明, 槽式聚光热电联供系统发电成本已与平板的持平, 且每年还可提供 4838.38MJ 热量供用户使用。

关键词: 聚光; 太阳电池; 热电系统; 实验

中图分类号: TK519 **文献标识码:** A

0 引言

高效利用太阳能, 提高太阳能利用品位, 是当今世界太阳能利用的热点之一。以低成本的聚光反射装置汇聚太阳光, 光强被浓缩 X 倍后作用于光伏电池, 则其输出功率将成倍增加, 可降低太阳能光伏发电成本; 同时, 采用强制冷却方式可保证聚光后光伏电池处于正常工作状态, 并可获热能利用, 提高能量综合利用率, 实现光伏与光热的结合 (PV/T)。文献 [1, 2] 首先提出了热电联供系统; 文献 [3~6] 报道了 PV/T 系统集热性能; 文献 [7~10] 对平板式 PV/T 系统进行了研究; 文献 [11, 12] 对系统运行成本及系统经济性能方面进行了报道; 文献 [13] 对槽式聚光系统的设计和热电性能进行了研究; 文献 [14, 15] 在实验室里对单片常规电池进行了实验和模拟计算, 而实际聚光状态下对电池阵列性能的研究未见报道。聚光状态下深入系统地研究 PV/T 电池阵列特性并与常规太阳电池发电及太阳能热利用进行性能及经济比较, 是聚光太阳能热电联供系统研究的重要关键所在。本文采用 2m² 槽式太阳能聚光热电联供 (TCPV/T) 装置, 对聚光后的单晶硅电池阵列、多晶硅电池阵列、空间太阳电池阵列、砷化镓电池阵列进行

性能实测研究, 在分析热电系统性能基础上, 选择性能优越的砷化镓电池阵列建立 10m² TCPV/T 系统, 并获得实验结果。研究工作将为太阳能聚光作用下热电系统规模化应用提供科学依据及支撑。

1 TCPV/T 实验系统及工作原理

TCPV/T 系统由 4 部分组成: 抛物镜面和支撑体构成的反射系统, 光伏电池阵列、蓄电池和逆变器构成的高品位电能输出系统, 热水和存储箱构成的热能输出系统, 控制卡、步进电机和电动推杆构成的自动跟踪系统。采用 MODEL460-1A LASER POWER METER 测量聚光光强, 测量聚光倍数的精度达 $\pm 1\%$ 。利用 TRM-FD1 和 TRM-2 采集气象数据和流体进出口温度, 其相应测量仪器的精度为: TBQ-2 型总辐射表为 $\pm 2\%$; TBS-2-2 型直辐射表为 $\pm 2\%$; EC-9S(X) 风速传感器为 $\pm (0.3 + 0.03V) \text{ m/s}$; 热电偶温度探头为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$; 涡轮流量计为 $\pm 1\%$ 。电池阵列输出功率采用 TFC40/450 光伏方阵/组件测试仪测量, 测量精度为 $\pm 1\%$, 电池阵列工作温度用 Fluke 红外测温仪测量, 测量精度为 $\pm 1\%$ 。TCPV/T 系统工作原理如图 1 所示, 太阳光线经槽式抛物反射镜面

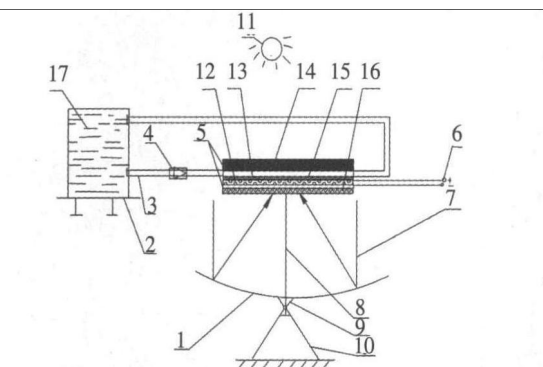
收稿日期: 2009-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(50966004); 高等学校博士学科点专项科研基金(20095303110001); 云南省科技计划资助项目(2007C0016Z; 2008CA024); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助

通讯作者: 李明(1964—), 男, 博士、教授, 主要从事太阳能制冷空调、太阳能聚光发电领域的研究。lmlddy@126.com

汇聚到光伏电池阵列上,产生电能对外供电;通过冷却流体在内腔体内流动强制带走电池上的热量,保证电池工作在正常温度下,所获得的热量供用户使用。电池阵列由导热绝缘胶贴在内腔体上,内腔体与外腔体之间由保温材料隔开起保温作用。

抛物反射镜面实际聚光面积为 1440mm × 1450mm,理论聚光比为 16.92,采用激光功率计测量系统实际聚光比为 10.27。



1. 槽式反射镜面 2. 流体贮热箱 3. 导管 4. 泵
5. 热电联供复合接收器 6. 电能输出电极 7. 太阳光线
8. 支撑连接杆 9. 旋转轴 10. 地面支撑架 11. 太阳
12. 电池阵列 13. 导热胶 14. 保温层 15. 内腔体
16. 外腔体 17. 冷却流体

图 1 槽式聚光太阳能 PV/T 系统装置图

Fig.1 The diagram of trough concentrating solar system

2 TCPV/T 系统实验性能

2.1 2m² TCPV/T 系统

2.1.1 4 种电池阵列性能测试

设计制作 2m² 槽式聚光 PV/T 系统如图 2 所示。



图 2 2m² TCPV/T 系统

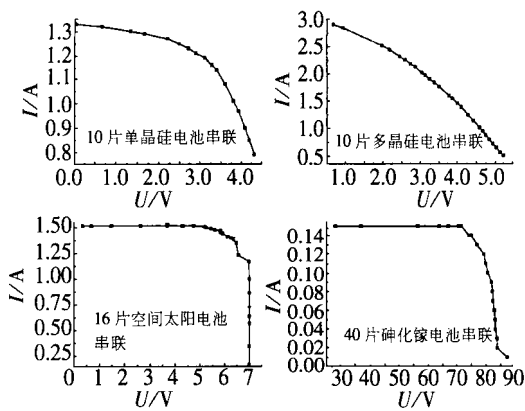
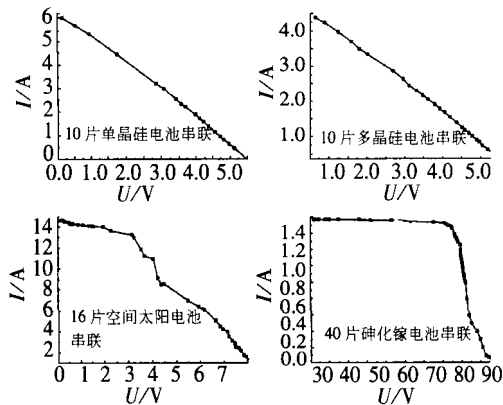
Fig.2 2m² TCPV/T system

电能输出单元由 4 种电池阵列组成,其中单晶硅电池阵列由 10 片一般商业化电池串联组成,单片面积为 103mm × 51.5mm;多晶硅电池阵列由 10 片美国生产的单片面积为 117mm × 75mm 的电池串联组成;空间太阳电池阵列由 16 片美国生产的单片面积为 71mm × 62mm 的电池串联组成,且基体材料也为晶体硅;砷化镓电池阵列由 40 片单片面积为 40mm × 30mm 的电池串联组成。在同一时刻,测试同种电池阵列聚光前后的特性参数如表 1 所示。聚光前后电池阵列 I-V 曲线如图 3、图 4 所示。

表 1 电池阵列特性参数

Table 1 The parameters of different cell arrays

电池阵列参数	光强	单晶硅电池阵列	多晶硅电池阵列	空间太阳电池阵列	砷化镓电池阵列
V_{oc}/V	普通光强	4.95	5.30	8.07	95.70
	聚光光强	5.50	5.60	11.50	105.40
I_{sc}/A	普通光强	1.33	3.00	1.55	0.15
	聚光光强	6.52	5.00	13.56	1.77
$FF/\%$	普通光强	59.22	40.90	70.56	78.51
	聚光光强	25.60	33.98	36.28	67.31
$\eta/\%$	普通光强	7.5	7.66	13.28	24.02
	聚光光强	1.77	1.12	6.67	26.53
P_m/W	普通光强	3.8988	6.5031	8.8265	11.27
	聚光光强	9.1793	9.5152	44.3166	125.57
R_s/Ω	普通光强	0.88255	0.96305	0.41942	0.53336
	聚光光强	0.99201	0.98671	0.43184	0.68776
$I_{cell}/W \cdot m^{-2}$	总辐射	979.51	967.30	943.21	977.48
	直射	951.96	942.72	918.54	960.0

图3 普通光强下4种电池阵列的 $I-V$ 曲线Fig.3 The $I-V$ curve of different cell arrays in 1 sun图4 聚光光强下4种电池阵列的 $I-V$ 曲线Fig.4 The $I-V$ curve of different cell arrays in concentrating irradiance

电池阵列的填充因子和效率可由(1)、(2)式计算:

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{n I_{cell} A_{cell}} \quad (2)$$

式中, P_{\max} ——最大功率点; V_{oc} , I_{sc} ——分别为电池阵列的开路电压和短路电流; A_{cell} ——电池面积; I_{cell} , n ——在聚光下分别为直辐射和实际聚光比; 在普通聚光下 I_d 为总辐射且 $n=1$ 。由表1可知, 聚光后, 太阳能流密度增加, 所有电池阵列的光生载流子增多, 短路电流 I_{sc} 变大, 开路电压 V_{oc} 有小幅度增加。光强汇聚后引起电池温度升高、串联内阻 R_s 增加^[16-19], 当 R_s 增加, 电池的填充因子 FF 降低。聚光后, 晶硅电池阵列的效率 η 都会下降, 其中单晶硅电池阵列的效率由聚光前的 7.5% 下降到 1.77%, 多晶硅电池阵列的效率由聚光前的 7.66% 下降到 1.22%, 空间太阳电池阵列的效率从 13.28% 下降到 6.67%。而砷化镓电池的效率反而增加, 从 24.02% 增加到 26.53%。主要原因可由(3)

式解释, 输出功率的损失主要由 $I^2 R_s$ 决定, 从表1可知, 晶硅电池阵列串联内阻 R_s 大, 且电池中流经电流也很大, 导致输出功率损失巨大, 效率会下降很多; 而砷化镓电池阵列聚光后为高电压低电流输出, 且串联内阻 R_s 较小, 因此输出功率损失较小, 效率会增加。

$$P = \frac{NIAkT_p}{q} \ln\left(\frac{I_L - I}{I_0} + 1\right) - I^2 R_s \quad (3)$$

式中, A ——PN 结品质因子; k ——玻尔兹曼常数; T_p ——太阳电池的工作温度; q ——基本电荷常数; R_s ——电池的串联内阻; I_0 ——二极管反向饱和电流; I_L ——光生电流; N ——电池阵列的电池片数。

图3和图4为聚光前后电池阵列 $I-V$ 特性曲线, 由图可知, 聚光前所有电池阵列特性曲线都较好, 聚光后只有砷化镓电池阵列保持较好的 $I-V$ 特性, 主要原因在于砷化镓材料具有带宽 ($E_g = 1.43\text{eV}$)、与太阳光谱匹配良好、吸收系数大、抗辐射能力强、高温性能好等优点^[20], 在阳光的激发下, 其光生载流子属直接跃迁型, 相应的吸收系数很大, I_{sc} 增大。本系统采用的砷化镓电池阵列聚光后电池效率增加到 26.53%, 最大输出功率放大了 11.14 倍, 与文献[9, 10, 13]报道相符。叠层砷化镓电池的极限效率可以达到约 40%^[21], 在 500 倍或者更高倍数的聚光下, 砷化镓电池仍然保持 25% ~ 27% 的光电转化效率^[22], 因此砷化镓电池是 PV/T 系统较好的选择。

2.1.2 采用4种电池阵列的 2m^2 TCPV/T 系统性能比较

系统电性能和热性能是评价 TCPV/T 系统性能优劣的主要参数, 本文对采用4种电池阵列的系统进行热电性能测试, 测试条件为: 平均风速 0.5m/s, 最大风速 1m/s; 直辐射强度范围 800 ~ 850W/m²; 环境温度变化范围 18.1 ~ 22.5℃; 冷却工质流量相对稳定在 40L/h, 误差范围约在 1L/h。根据测试结果计算系统的热、电效率, 公式如下:

$$\eta_t = mc_{p,f}(T_{out} - T_i)/I_d A_m \quad (4)$$

$$\eta_{pv} = P_{\max}/I_d A_m \quad (5)$$

式中, m ——工质的质量流量; $c_{p,f}$ ——工质平均温度下的定压比热容; T_i 和 T_{out} ——分别为工质的进出口温度; I_d ——平均直辐射; A_m ——聚光有效面积; P_{\max} ——电池阵列的最大输出功率。计算结果及效率拟合曲线如图5所示, 图中 T_a 为环境温度。

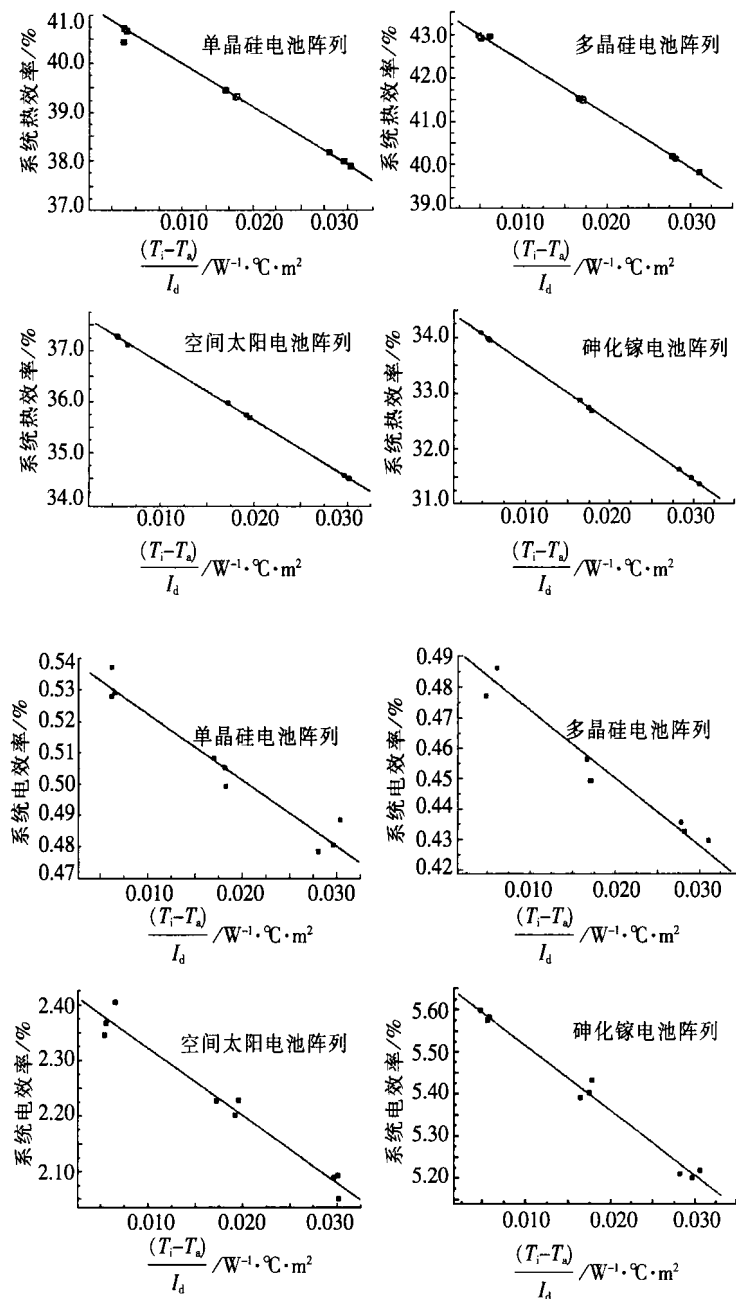


图5 采用4种电池阵列的TCPV/T系统效率曲线

Fig.5 Efficiency curves for TCPV/T system adopted four solar cell arrays

由图5可知,采用多晶硅电池阵列的系统热效率最高,其次为单晶硅电池阵列系统,最差的为砷化镓电池阵列系统。因为多晶硅电池阵列面积大,汇聚的光能大部分被电池吸收,而砷化镓电池阵列面积小,大部分光照射在吸收率较小的内腔体上,系统能量吸收较少,热效率较小。因砷化镓电池优异的电性能使采用砷化镓电池阵列的系统电效率最高,其次为空间太阳电池阵列系统,多晶硅电池阵列系统电性能最差。

由实验和计算结果可知,砷化镓电池为聚光光

伏热电联供系统最佳选择。本文 2m^2 TCPV/T系统聚焦宽度较大,为 10cm ,而采用的砷化镓电池宽度只有 4cm ,大部分汇聚光强没有被利用,不仅影响系统热效率,而且在聚光后,将光电转化效率达到 26.53% 的砷化镓电池阵列系统的电效率降到仅约为 5.4% 。因此本文结合砷化镓电池特征提出优化方案,改进反射镜面,减小聚焦宽度,让大部分光强汇聚在电池阵列上,还增加反射面开口宽度,提高聚焦比。同时建立 10m^2 TCPV/T系统,并进行测试实验。

2.2 10m^2 TCPV/T系统

10m^2 槽式聚光热电联供系统如图6所示。将

系统的综合性能与 2004 年 Australian National University (ANU) 建立的 300m², 峰值功率 40kW, 聚光比 38 倍 TCPV/T 系统的性能进行了比较, 如表 2 所示。

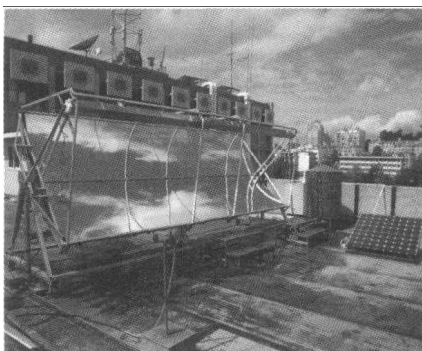


图 6 10m² 槽式聚光 PV/T 系统

Fig.6 10m² trough concentrating PV/T system

表 2 两套槽式聚光 PV/T 系统特性参数

Table 2 The parameters of two trough concentrating PV/T systems

系统参数/m ²	10	300
镜面面积/m ²	1	2.18
镜面数	10	136
总面积/m ²	9.25	297
总电池面积/m ²	0.19	6.8
镜面面积/电池面积	69.9	44
旋转角度/(°)	± 75	± 90
精确度/(°)	0.1	0.1
聚光比	20×	38×
镜面效率	0.65	0.83
电池阵列光电效率/%	23.21	21
集热器采光率	0.9	0.94
水箱容积/L	150	6000
总输出最大直流电功率/kW	0.823	32
热功率/kW	3.326	160

注: 测试条件: 直射光 900W/m², 环境温度 293K, 风速 1m/s

由表 2 可知, 本文 10m² TCPV/T 系统聚光比、镜面效率和集热器采光率比 ANU300m² 系统都要低, 且单位镜面面积上的电池面积也要小, 因此本系统单位面积输出功率为 82.3W, 而 ANU 系统单位面积输出功率为 106.67W; 但本系统输出功率提升空间很大, 如提高本系统镜面效率和增加系统聚光比, 采用镀银镜面可使反射率增至 0.9, 则本系统单位面积输出功率为 113.95W。若优化电池阵列, 如减少光伏电池间隙可在长 5m 的内腔体上贴长度为 0.03m 的砷化镓电池 166 片, 再使焦线宽度从原来的 6cm 减小至只有电池的宽度 4cm, 则单位面积的输出功率可达 177.33W。

由于热电价值不一, 槽式聚光热电联供复合系统性能须用焓效率进行分析, 经计算得到 10m² TCPV/T 系统的焓效率为 13.48%, 单独平板光伏发电系统焓效率为 11.64%, 基于槽式聚光系统加热真空管焓效率为 5.22%。TCPV/T 复合系统焓效率比真空管焓效率高 158%, 比平板光伏发电系统焓效率高 16%。3 种太阳能利用设备在同一时刻测试的实验数据如表 3 所示, 焓效率的计算公式如下:

$$E_{\text{use}} = Q_{\text{R-elec}} + m \{ [h - (T_a + 273.15) s]_{\text{out}} - [h - (T_a + 273.15) s]_{\text{in}} \} \quad (6)$$

$$\eta_{\text{exergy}} = \frac{E_{\text{use}}}{A_m I_e \times \left(1 - \frac{T_a + 273.15}{5777} \right)} \quad (7)$$

式中, $Q_{\text{R-elec}}$ ——太阳能利用设备的最大输出功率; h, s ——分别为工质在进出水温度下的焓和熵; T_a ——环境温度; I_e ——辐照度; A_m ——采光面积。

表 3 3 种太阳能利用设备的性能对比

Table 3 Comparison with the performance of the three solar utilize equipments

	采光面积 /m ²	辐照度 /W·m ⁻²	环境温度 /°C	进水温度 /°C	出水温度 /°C	流量 /L·h ⁻¹	最大输出 电功率/W	焓 /%
槽式聚光加热真空管	1.95	910.0	18.0	40.0	59.40	40.0	—	5.22
平板光伏发电	1.06	941.0	18.0	—	—	—	110.60	11.64
槽式聚光热电联供	9.25	910.0	18.0	40.0	51.32	260.0	780.39	13.48

2.3 槽式聚光太阳能 PV/T 系统经济性

由表 4 知整套 10m² 太阳能 TCPV/T 系统的初期成本为 9261 ¥, 其最大输出电功率为 291.78W, 发电成本为 31.74 ¥/W; 商用普通单晶硅太阳电池成本为 5000 ¥, 其最大输出电功率为 160W, 发电成本为 31.25 ¥/W。可知, 该 TCPV/T 样机的发电成本几乎

与普通商用单晶硅太阳电池持平, 但该系统还能获得额外热收益。

据表 5 知, 全年该太阳能系统可获得电能 534.029kW·h, 热能共 4838.38MJ。昆明地区居民用热水除靠太阳能热水器提高外主要靠管道煤气和电加热, 电热水器每年的运行费用是加热水所耗电费,

表4 经济参数表

Table 4 Parameters of economy

经济参数	单晶硅空间 太阳能电池成本	接受器和其他 设备成本	商用普通单晶硅 太阳能电池成本
数值	4861 ¥	4400 ¥	5000 ¥

效率取国家标准 GB4706-1995 要求的 90%^[23], 目前昆明市民用电价为 0.5 ¥/kW·h; 燃气热水器的效率

表5 槽式聚光太阳能 PV/T 系统的月发电量和产热量

Table 5 The monthly thermal and electrical output of the trough concentrating solar PV/T system

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
直射辐射/MJ·m ²	310.62	283.55	256.73	230.51	203.67	150.00	149.73	141.98	174.50	206.71	230.70	163.06
月发电量/kW·h	50.029	49.592	48.116	47.160	45.724	39.004	37.868	36.380	44.424	45.904	47.192	42.636
月产热量/MJ	600.65	548.30	496.44	445.74	393.84	290.76	289.53	274.55	337.43	399.72	446.11	315.31

整套系统以获得电能、降低单位发电成本、提高光电转化率为主要目的。其发电成本基本与传统的光伏电池板持平, 但获得电能同时还获得大量的热能, 这部分热以约 50℃ 的热水形式存储, 可供用户采暖或日常生活用水。对于其热、电的分配方式以及对用户需求与供给方面的问题将在以后的研究中进行探讨。

3 结论

1) 基于自主设计制作的 2m² TCPV/T 系统, 对晶硅电池阵列和砷化镓电池阵列进行性能实验, 结果表明聚光后晶硅电池阵列 *I-V* 曲线变成直线, 而直接跃迁型砷化镓电池聚光后具有良好 *I-V* 特性曲线、较高的光电转化效率和填充因子, 其为聚光光伏系统最佳选择;

2) 以砷化镓电池阵列为电能输出单元建立了 10m² TCPV/T 系统。由表 2 计算可知, 优化后的系统, 电效率为 9.88%, 热电总效率达到 49.84%, 同时系统热效率达到 13.48%。并与 ANU300m² TCPV/T 系统进行比较, 本系统电池阵列的光电效率较高, 相同情况下输出电能也更多。若优化电池阵列和镜面, 该系统输出功率可达到 177.33W/m²。本热电系统的热效率比真空管的效率高 158%, 比平板光伏发电系统的热效率高 16%;

3) 对采用高性价比的空间太阳能电池阵列的 TCPV/T 系统和商业化平板光伏系统进行经济性能分析可知, 规模化 TCPV/T 系统与现在平板的光伏电池发电成本持平, 且系统可提供相当于同等集热面积的水器提供的热水供用户使用, 或者再次循

取国家标准 QB1238-91 要求的 80%, 燃烧热值为 15.6MJ/m³, 目前昆明居民燃气价格为 1.1 ¥/m³。设每年由电热水器和燃气热水器提供的热量与槽式聚光太阳能 PV/T 装置获得的相同, 为 4838.38MJ。若该热量完全由燃气热水器供给, 约需耗燃气 387.69m³, 合人民币 426.46 ¥; 若由电热水器提供, 约需耗电 1344kW·h, 合人民币 672 ¥。

环提高出水温度用作中高温热能的利用, 可做到高效太阳能能量综合利用。因此槽式聚光 PV/T 系统具有较好的应用前景。

[参考文献]

- [1] Hendrie S D. Photovoltaic/thermal collector development program [Final Report] MIT[R]. New-York: Lincoln Laboratory, 1982.
- [2] Russell T, Beall J, Loferski J J, et al. Combined Photovoltaic/thermal collector panels of improved design[A]. Proceedings of IEEE Photovoltaic Specialist's Conference[C], Network, 1981, 990—996.
- [3] Zondag H A, Devries D W, van helden W G J. The yield of different combined PV-thermal collector designs[J]. Solar Energy, 2003, 74: 253—269.
- [4] Sandnes B, Pekstad J. A Photovoltaic/thermal(PV/T) collector with polymer absorber plate. Experimental and analytical model[J]. Solar Energy, 2002, 72(1): 63—73.
- [5] Platz R, Fischer D, Zufferey M A, et al. Hybrid collectors using thin-film technology[A]. Proceedings of 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference[C], Anaheim, 1997.
- [6] Affolter P, Haller A, Ruoss D, et al. A new generation of hybrid solar collectors-absorption and high temperature behavior evaluation of amorphous modules[A]. Proceedings of 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference[C], Glasgow, UK, 2000.
- [7] Bengene T, Lovvik O. Model calculation on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells[J]. Solar Energy, 1995, 55(6): 453—462.
- [8] Tripanagnostopoulos Y, Nouis T, Soulists M. Hybrid Photovoltaic/thermal solar systems[J]. Solar Energy, 2002, 72

- (3): 217—234.
- [9] Tiwari Arvind, Sodha M S. Performance evaluation of solar PV/T system: An experimental validation[J]. *Solar Energy*, 2006, 80(7): 751—759.
- [10] Ji J, Lu J P, Chow T T, et al. A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation[J]. *Applied Energy*, 2007, 84(2): 222—237.
- [11] Tripanagnostopoulos Y. Cost effective designs of building integrated PV/T solar systems[A]. Proceedings of 21st European PV Solar Energy Conference [C], Dresden, Germany, 2006.
- [12] Fraisse G, Ménézo C, Johannes K. Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of direct solar floor type[J]. *Solar Energy*, 2007, 81(11): 1426—1438.
- [13] Coventry J S. Performance of concentrating Photovoltaic/thermal solar collector[J]. *Solar Energy*, 2005, 78(2): 211—222.
- [14] 吴玉庭, 朱宏晔, 任建勋, 等. 聚光条件下太阳能电池的电特性分析[J]. *太阳能学报*, 2004, 25(3): 337—340.
- [15] 苑进社. 常规晶硅太阳能电池在低倍聚光条件下应用研究[J]. *太阳能学报*, 2003, 24(2): 253—256.
- [16] El-Adawi M K, Al-Nuaim I A. A method to determine the solar cell series resistance from a single *I-V*. Characteristic curve considering its shunt resistance-new approach[J]. *Vacuum*, 2001, 64(1): 33—36.
- [17] 赵富鑫, 魏言章. 太阳能电池及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985, 327—328.
- [18] Rohatgi A, Davis J R, Hopkine R H. Effect of titanium, copper and iron on silicon solar cells[J]. *Solid State Electronics*, 1980, 23: 415—422.
- [19] 徐永锋, 李明, 王六玲, 等. 槽式聚光太阳能系统太阳能电池阵列的实验研究[J]. *半导体学报*, 2008, 29(12): 2421—2426.
- [20] 李 标, 向贤碧, 游志朴, 等. 高效 AlGaAs/GaAs 太阳能电池的研制及辐照效应[J]. *半导体学报*, 1995, 16(10): 741—746.
- [21] Zahler J M, Morral F I, Ahn C G, et al. Wafer bonding and layer transfer processes for high efficiency solar cells[A]. NCPV and Solar Program Review Meeting [C], US, 2003, 723—726.
- [22] Andreev V M, Grilikhes V A, Khvostikov V P, et al. Concentrator PV modules and solar cells for TPV systems[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2004, 84(1-4): 3—17.
- [23] 孙振华, 王如竹, 翟晓强. 直膨式太阳能热泵热水器实验研究及经济性分析[J]. *上海电力*, 2007, 5: 475—479.

THE EXPERIMENTAL STUDY OF TROUGH CONCENTRATING SOLAR PHOTOVOLTAIC/THERMAL SYSTEM

Wang Liuling¹, Xu Yongfeng², Li Ming², Xiang Ming²,
Wang Yunfeng², Lin Wenxian², Wei Shengxian²

(1. School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China;

2. Key Laboratory of Advanced Technique & Preparation for Renewable Energy Materials, Ministry of Education, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

Abstract: The performance testing experiment of crystalline silicon cell array and GaAs cell array have been carried out on the 2m² trough concentrating photovoltaic/thermal system independently. Experimental results showed that performance of GaAs cell array is better than that of crystalline silicon cell array. The 10m² trough concentrating solar photovoltaic/thermal system which adopt GaAs cell array selected from prior experimental result of excellent performance in condition of solar concentrating radiation has been established. The experimental results showed that photoelectric efficiency of GaAs cell array is 23.21%, the electric efficiency and thermal efficiency of this system are 9.88% and 49.84%, respectively at the 10m² trough concentrating system. The exergy of the system is 13.48%, which is higher 158% than that of evacuated tube heated by trough concentrating and is higher 16% than flat-plate photovoltaic system. The cost of generate electricity with trough concentrating photovoltaic/thermal system adopted super cell array can catch that of standard flat-plate photovoltaic station, in addition, the photovoltaic/thermal system can offer 4838.38MJ heat energy to user every year.

Keywords: concentrating light; solar cell; photovoltaic/thermal system; experiment