

# 聚光光强对光伏电池阵列输出性能的影响\*

徐永锋<sup>1)†</sup> 李 明<sup>1)</sup> 王六玲<sup>2)</sup> 林文贤<sup>1)</sup> 张兴华<sup>2)</sup> 项 明<sup>2)</sup> 王云峰<sup>2)</sup> 魏生贤<sup>1)</sup>

1) 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)

2) 云南师范大学物理与电子信息学院, 昆明 650092)

(2008 年 12 月 21 日收到, 2009 年 3 月 17 日收到修改稿)

基于槽式聚光热电联供系统, 深入分析晶硅电池阵列和砷化镓电池阵列在高倍聚光下的输出特性及输出功率的影响因素. 研究结果表明, 聚光光强下砷化镓电池阵列输出性能优于晶硅电池阵列, 高光强会导致光伏电池禁带宽度变窄, 短路电流成倍增加, 增加输出功率, 但同时耗尽层复合率变大, 开路电压降低, 制约阵列的输出功率, 高光强还引起电池温度升高, 电池阵列串联内阻增加. 分析表明聚光作用下电池阵列串联内阻对输出功率影响巨大, 串联内阻从  $0 \Omega$  增加  $1 \Omega$ , 四种电池阵列输出功率分别损失 67.78%, 74.93%, 77.30% 和 58.01%.

关键词: 热电联供, 太阳电池阵列, 串联内阻, 输出功率

PACC: 8630J, 7850G

## 1. 引 言

能源危机促使太阳能研究成为热点之一, 在降低光伏发电成本基础上提高光伏电池转化效率, 或利用低品位热能驱动其他高品位绿色技术是高效利用太阳能的重点, 而聚光太阳能系统以其成本低廉、绿色环保和高效利用太阳能成为研究的一个全新方向. 国内外开展了热电联供(PV/T)系统研究工作, Chow 和 Zondag 研究 PV/T 集热器性能<sup>[1,2]</sup>, Ji, Garg, Fraisse 和 Bergene 等对平板 PV/T 系统进行详细研究<sup>[3-6]</sup>, Rosell, Coventry 等研究低倍聚光和槽式聚光 PV/T 系统性能<sup>[7,8]</sup>, Huang, Tiwai, Arvind 和 Tripanagnostopoulos 等对 PV/T 系统性能进行评价<sup>[9-12]</sup>, 国内中国科技大学和上海交通大学都已对 PV/T 系统进行了研究<sup>[13,14]</sup>, 但对应用于聚光 PV/T 系统的光伏电池阵列输出性能的研究国内外还未报道. 为深入研究聚光下电池阵列输出特性和影响因素, 本文基于结构简单、跟踪容易、维护方便的槽式聚光热电联供(TCPV/T)系统对晶硅电池阵列和砷化镓电池阵列进行了实验研究和模拟计算, 研究工作作为提升 TCPV/T 价值和规模化利用聚光光伏发电

具有重要意义.

## 2. 实验与计算

### 2.1. TCPV/T 系统

图 1 为 TCPV/T 系统实物图. 槽式抛物反射面将太阳光汇集到贴有光伏电池阵列的集热器上, 电池阵列通过导线输出电能. 为防止电池工作温度过高, 电池阵列背面的圆形管道中通有冷却水带走热量, 降低电池阵列工作温度. 热水被储存在保温箱内对外供热, 内腔体与外腔体之间被保温材料隔开减少热损. 以低成本 TCPV/T 系统同时获得高品位电能和附属热能, 做到高效利用太阳能.

通过汇聚光强作用光伏电池, 可提高电池输出功率, 但高光强对光伏电池输出性能有较大影响. 为了解电池阵列聚光特性和优化电池阵列结构, 对高光强下光伏电池阵列的输出特性和影响因素进行理论计算和实验研究.

### 2.2. 实验方法与计算模型

基于 TCPV/T 系统对单晶硅电池、多晶硅电池、

\* 国家高技术研究发展(863)计划(批准号: 2006AA05Z410), 国家基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2007CB216405), 云南省自然科学基金重点项目(批准号: 2007C0016Z, 2005E0031M), 教育部出国留学回国人员基金资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: lmllldy@126.com



图 1 TCPV/T 系统实物图

空间太阳电池三种晶硅电池阵列和砷化镓电池阵列的聚光性能进行实验研究和理论计算并分析电池阵列输出性能影响因素,四种电池阵列规格见表 1.

表 1 四种电池阵列规格

	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
面积/m <sup>2</sup>	0.103 × 0.0515	0.117 × 0.075	0.071 × 0.062	0.04 × 0.03
片数	10	10	16	40
连接方式	串联	串联	串联	串联

光伏电池直流模型电流方程<sup>[15]</sup>

$$I = m\phi - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (1)$$

其中

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\exp \left( \frac{qV_{oc}}{AkT} \right) - 1}. \quad (2)$$

当  $V = 0$  时得到短路电流方程如下:

$$I_{sc} = m\phi - I_0 \left[ \exp \left( \frac{qI_{sc}R_s}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}}. \quad (3)$$

同理可得开路电压方程

$$V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left( \frac{m\phi - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{I_0} + 1 \right). \quad (4)$$

电池阵列输出功率方程如下:

$$P_m = \frac{AkT}{q} I_m \ln \left( \frac{m\phi - I_m - \frac{V_m + I_m R_s}{R_{sh}} + I_0}{I_0} \right) - I_m^2 R_s. \quad (5)$$

电池阵列串联内阻方程<sup>[16]</sup>

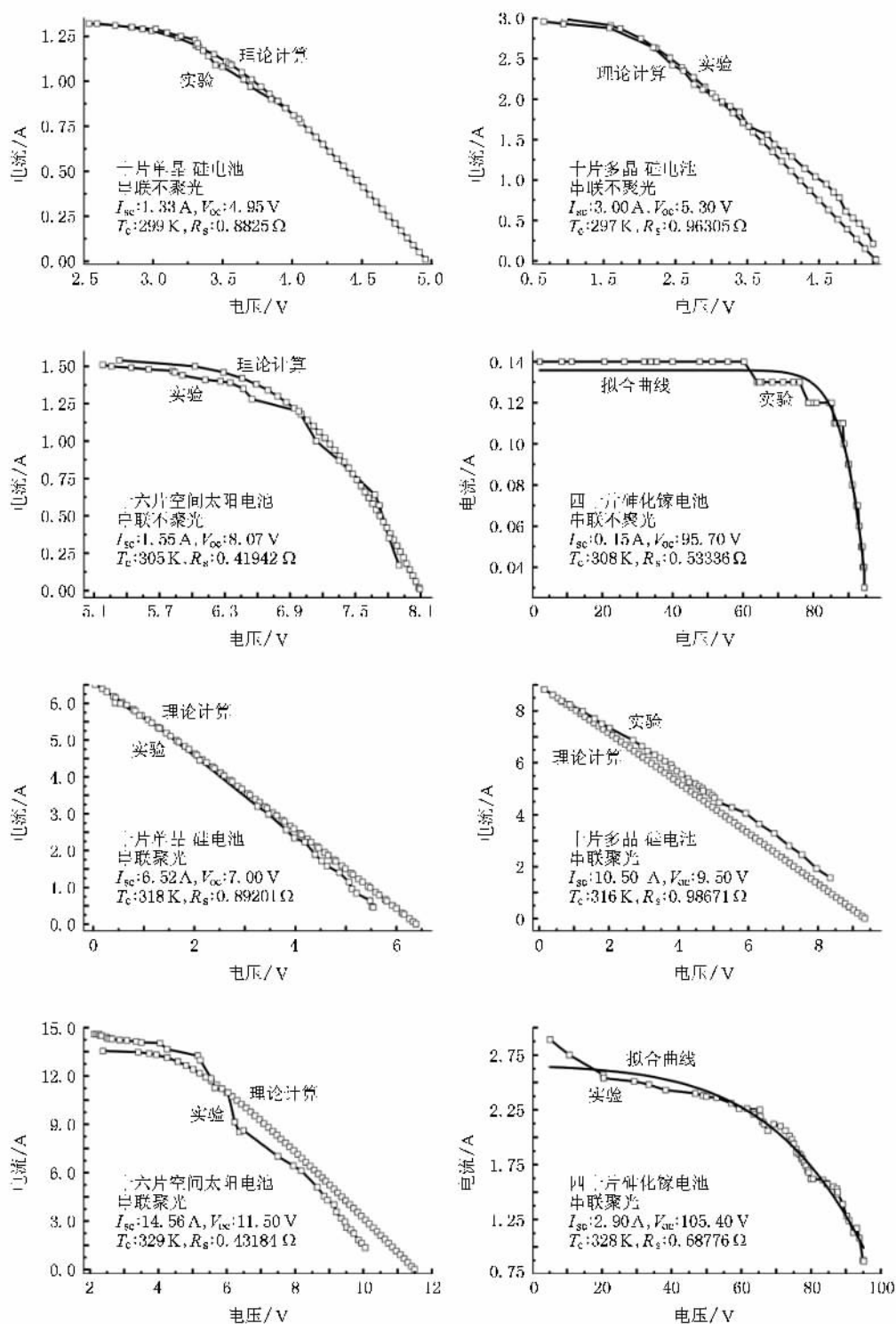
$$R_s = \frac{AkT}{qI_m} \ln \left( \frac{m\phi + I_0 - I_m - \frac{V_m + I_m R_s}{R_{sh}}}{I_0} \right) - \frac{V_m}{I_m}. \quad (6)$$

国内外对工作于实际高光强下的光伏电池阵列特性测量尚未涉及,本文通过改变负载采样电阻阻值来测量电路中的电压和电流,并用 MODEL460-1A LASER POWER METER 测量聚光光强强度;利用 Fluke2635,TRM-FD1 和 TRM-2 采集电池阵列的电压电流和流体进出口温度;电池阵列输出功率用 TFC40/450 光伏方阵/组件测试仪测量;电池阵列工作温度用 Fluke 红外测温仪测量,还利用 Matlab 对建立的电池阵列模型进行模拟计算并将实验测量数据与理论计算值进行分析比较.实验测量  $I-V$  曲线与模拟曲线有一定偏差,因为高光强下,电路中通过较大电流,导线和变阻器的温度都会升高很多引起负载电阻不断增加,导致不可避免的测量误差产生,但实验测量最大功率点和理论模拟结果偏差不大于 5.6%,表明该方法可用于聚光光伏系统电池阵列输出功率的测量.

### 3. 结果与分析

实测聚光前后四种电池阵列的  $I-V$  特性曲线,将晶硅电池阵列曲线与理论计算曲线进行对比,并用最小二乘法对实验测量砷化镓电池  $I-V$  曲线进行拟合,如图 2 所示.

由图 2 可知,聚光后电池阵列的  $I-V$  特性品质降低,单晶硅阵列特性参数 FF 和  $\eta$  分别由聚光前的 59.22% 和 7.50% 下降到聚光光强后的 25.60% 和 1.77%;多晶硅阵列的 FF 和  $\eta$  分别由 40.90% 和 7.66% 下降到 33.98% 和 1.12%;空间太阳电池阵列的 FF 和  $\eta$  分别由 75.34% 和 13.28% 下降到 36.28% 和 6.67%;砷化镓电池阵列的 FF 和  $\eta$  也分别由 71.22% 和 21.52% 下降到 49.00% 和 20.65%,且单、多晶硅电池阵列  $I-V$  曲线变成直线而空间电池阵列和砷化镓电池阵列的  $I-V$  曲线也变差.聚光光强的增加会引起电池温度升高,由实验测试可知,

图2 聚光前后四种电池阵列的  $I-V$  曲线

在相同风速、相同环境温度和相同冷却液流速时,光强每增加  $100 \text{ W/m}^2$ ,单晶硅阵列温度升高  $3.5689 \text{ K}$ ,多晶硅阵列温度升高  $3.3844 \text{ K}$ ,空间电池阵列温度升高  $8.4283 \text{ K}$ ,砷化镓电池阵列温度升高  $7.6507 \text{ K}$ .

由于聚光光强成高斯分布,能量的不均匀分布在光伏电池上产生“热斑”效应,造成电池温度分布不均匀,能量高的地方温升快,串联内阻增加,反过来,串联内阻增加,该区域内阻产热量大,进而促使该区域

温升加剧,最后由于温升过高,在该区域产生“白斑”对光伏电池造成不可恢复的损失.另外高光强成倍增加电池阵列短路电流,由(5)式可知,电流增加后,串联内阻上损失功率增加,导致电池阵列输出

性能不好, $I-V$ 曲线品质变差,文献[17]详细分析了串联内阻对电池阵列输出性能的影响.图3模拟计算聚光情况下不同内阻时四种电池阵列的 $I-V$ 曲线.

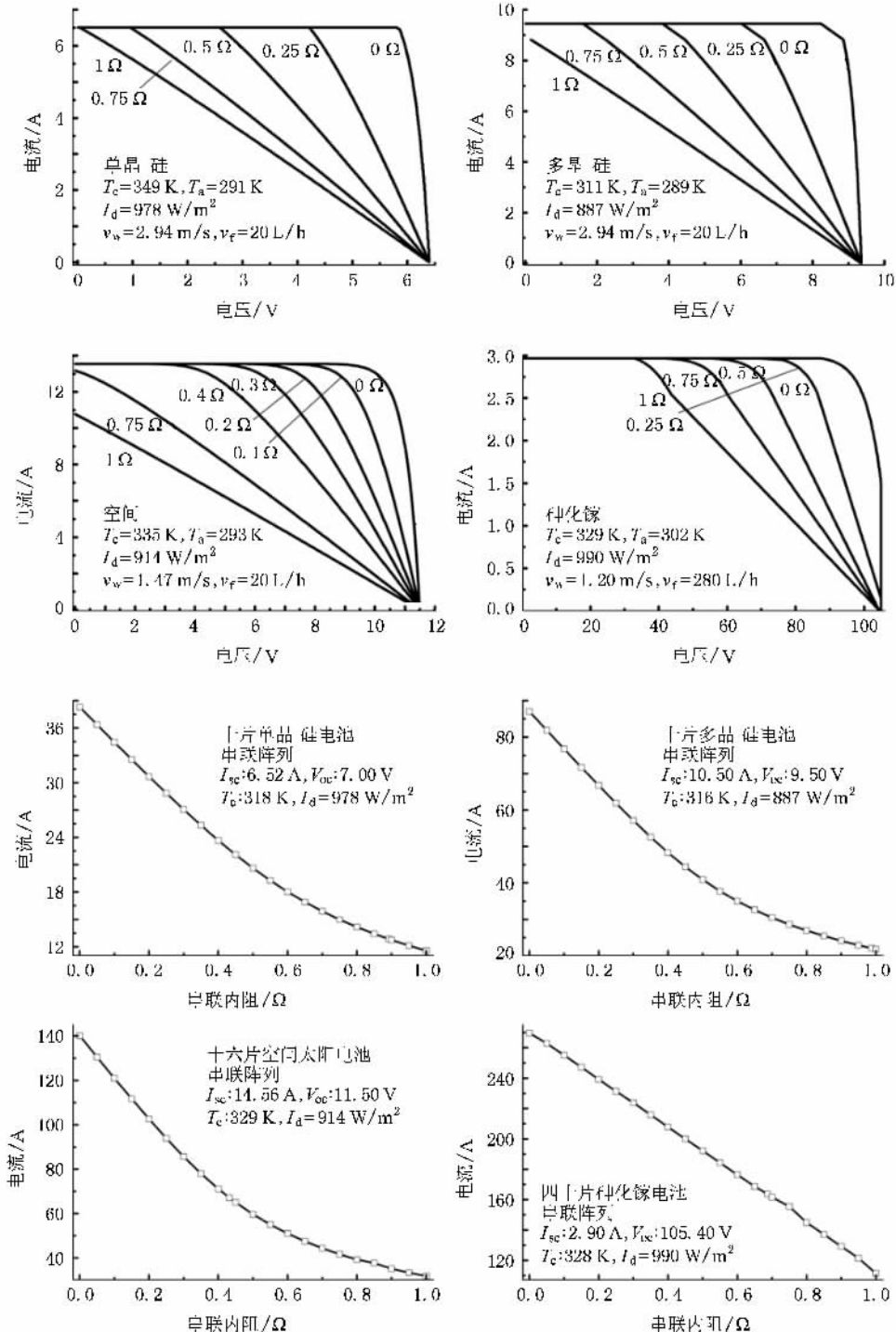


图3 不同内阻的四种电池阵列的  $I-V$  曲线和最大输出功率随串联内阻变化关系

从图3可知,聚光光强下,电池阵列内阻高于  $0.25\ \Omega$  时,单、多晶硅  $I-V$  特性曲线趋于直线;空间

太阳电池阵列和砷化镓电池阵列在串联内阻高于  $0.5 \Omega$  时,  $I-V$  曲线品质变差. 电池阵列串联内阻的增加会严重影响输出性能, 图 3 下边为四种电池阵列最大输出功率  $P_m$  随串联内阻  $R_s$  变化曲线, 晶硅电池阵列的  $P_m$  随  $R_s$  先大幅度下降, 当  $R_s$  增至一定值后,  $P_m$  缓慢下降, 而砷化镓电池阵列的  $P_m$  随  $R_s$  成线性下降. 如表 2 所示,  $R_s$  从  $0 \Omega$  增加  $1 \Omega$ , 晶硅阵列和砷化镓电池最大输出功率分别下降了  $67.78\%$ 、 $74.93\%$ 、 $77.30\%$  和  $58.01\%$ . 研究表明高光强下串联内阻对电池阵列输出特性影响巨大, 其中空间太阳电池阵列输出性能受  $R_s$  影响最大, 砷化镓电池阵列受串联内阻的影响较小.

由测量数据可知, 长时间工作高光强下的电池阵列开路电压  $V_{oc}$  和短路电流  $I_{sc}$  比实验室测量值都小. 为具体研究减小  $V_{oc}$  和  $I_{sc}$  对电池阵列输出性能的影响, 模拟计算出工作于 TCPV/T 系统的四种电池阵列随  $V_{oc}$  和  $I_{sc}$  下降的  $I-V$  曲线和输出功率随  $V_{oc}$  和  $I_{sc}$  变化曲线.

表 2 四种电池阵列最大输出功率随影响因素变化

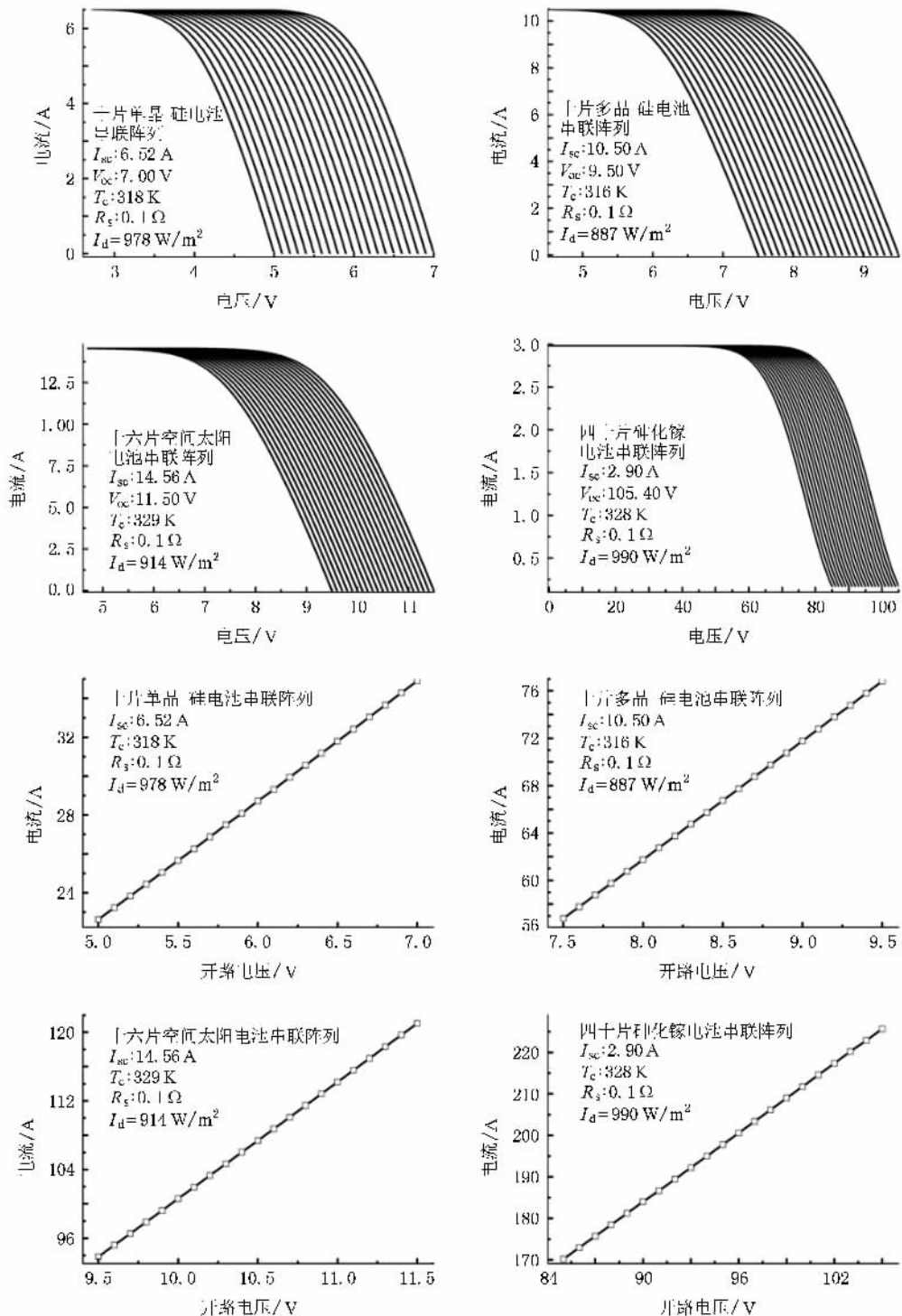
影响因素	单晶硅电池阵列输出功率变化率/%	多晶硅电池阵列输出功率变化率/%	空间太阳电池阵列输出功率变化率/%	砷化镓电池阵列输出功率变化率/%
$R_s$	-67.78	-74.93	-77.30	-58.01
$I_{sc}$	-15.2030	-9.4544	-6.5634	-3.2176
$V_{oc}$	-17.5833	-13.0357	-11.2352	-1.2297
$I_d$	5.2356	4.9650	5.8998	7.6507
$T_c$	-3.1868	-0.6151	-0.5041	-0.7469

由图 4 和图 5 可知, 降低  $V_{oc}$  和减少  $I_{sc}$  对四种电池阵列输出性能均产生影响, 图 4 上边最大功率点沿横坐标随  $V_{oc}$  降低而缓慢下降, 图 5 上边最大功率点沿纵坐标随  $I_{sc}$  减少而急剧下降. 由四种电池阵列最大输出功率随  $V_{oc}$  和  $I_{sc}$  变化曲线可知, 四种电池阵列最大输出功率  $P_m$  随  $V_{oc}$  下降而减少, 减少幅度也变小;  $P_m$  随  $I_{sc}$  降低也减少, 但减少幅度却增加. 表 2 给出四种电池阵列最大输出功率受  $V_{oc}$  和  $I_{sc}$  影响, 晶硅电池阵列中单晶硅阵列输出性能受流降和压降的影响最大, 电流每减少  $1 \text{ A}$  和电压每下降  $1 \text{ V}$  输出功率分别损失  $15.2030\%$  和  $17.5833\%$ ;

其次为多晶硅电池阵列, 功率分别损失  $9.4544\%$  和  $13.0357\%$ ; 空间太阳电池阵列受到影响最小, 功率分别以  $6.5634\%$  和  $11.2352\%$  损失, 从分析结果可知, 压降对晶硅电池阵列最大输出功率的影响大于流降. 但电流引起砷化镓电池阵列输出功率下降的程度大于电压的影响, 电流每减少  $1 \text{ A}$  和电压每下降  $1 \text{ V}$  输出功率分别下降  $3.2176\%$  和  $1.2297\%$ .

电池阵列输出功率不仅只受电池本身特性的限制, 不同天气时太阳直射和高光强下电池工作温度升高对电池阵列输出功率也产生较大影响. 图 6 和图 7 给出不同直射和不同工作温度时对四种电池阵列进行模拟计算和实验测试的输出特性曲线和输出功率变化图.

由理论计算和实验测试结果可得, 高光强可提高电池阵列输出电流, 同时也可小幅度增加阵列输出电压, 直射从  $100 \text{ W/m}^2$  增至  $1000 \text{ W/m}^2$  时, 单晶硅电池阵列的  $I_{sc}$  和  $V_{oc}$  分别从  $0.60 \text{ A}$  和  $3.70 \text{ V}$  增至  $5.60 \text{ A}$  和  $5.41 \text{ V}$ ; 直射从  $100 \text{ W/m}^2$  增至  $1000 \text{ W/m}^2$  时, 多晶硅电池阵列的  $I_{sc}$  和  $V_{oc}$  分别从  $0.72 \text{ A}$  和  $5.30 \text{ V}$  增至  $5.76 \text{ A}$  和  $5.91 \text{ V}$ ; 直射从  $100 \text{ W/m}^2$  增至  $1400 \text{ W/m}^2$  时, 空间太阳电池阵列的  $I_{sc}$  和  $V_{oc}$  分别从  $1.55 \text{ A}$  和  $7.89 \text{ V}$  增至  $18.90 \text{ A}$  和  $9.10 \text{ V}$ ; 直射从  $100 \text{ W/m}^2$  增至  $1400 \text{ W/m}^2$  时, 砷化镓电池阵列的  $I_{sc}$  和  $V_{oc}$  分别从  $0.58 \text{ A}$  和  $53.37 \text{ V}$  增至  $4.24 \text{ A}$  和  $90.35 \text{ V}$ . 对晶硅电池阵列而言, 直射增至一定值后, 串联内阻上损失功率较多, 其  $I-V$  曲线变成直线, 输出性能变差, 而砷化镓电池阵列结构不同于晶硅电池, 其输出特性优异<sup>[18-22]</sup>, 从图中可知在直射高达  $1400 \text{ W/m}^2$  时其输出特性品质仍然较高. 从功率图可知, 晶硅电池阵列输出功率随直射增加先急剧增加, 当直射增到一定程度, 输出功率增长缓慢, 此时晶硅电池阵列的  $I-V$  特性曲线变成直线. 结合特性曲线和功率图可得, 单晶硅电池阵列的  $I-V$  曲线在直射为  $900 \text{ W/m}^2$  时变成直线, 此后随着直射增加输出功率增长缓慢, 同理多晶硅电池阵列和空间太阳电池阵列输出功率随直射变化的拐点分别为  $700 \text{ W/m}^2$  和  $1000 \text{ W/m}^2$ ; 砷化镓电池阵列输出功率随直射增加先缓慢增加, 然后急剧上升. 由表 2 可知, 太阳直射每增加  $100 \text{ W/m}^2$ , 四种电池阵列平均输出功率分别增加  $5.2356\%$ 、 $4.9650\%$ 、 $5.8998\%$  和  $7.6507\%$ , 可见随着光强增加砷化镓电池输出功率增加更多.

图 4 不同  $V_{oc}$  时四种电池阵列的  $I-V$  曲线和功率变化图

普通光强下温度对光伏电池输出性能已有制约作用,聚光后电池温度升高更快,对电池输出性能影响更大.图 7 给出工作于不同温度下四种电池阵列  $I-V$  特性曲线和输出功率变化图.温度升高使光伏电池的禁带宽度变窄,耗尽区复合率增加,输出电压

降低,理论上电池短路电流是随温度升高而增加,但在聚光光伏系统中,电池温度迅速上升和聚光光强的不均匀性引起电池串联内阻增加很多,导致短路电流减小.TCPV/T 系统中串联电池阵列温度是递增分布,冷却流体出口端电池温度最高,串联内阻最

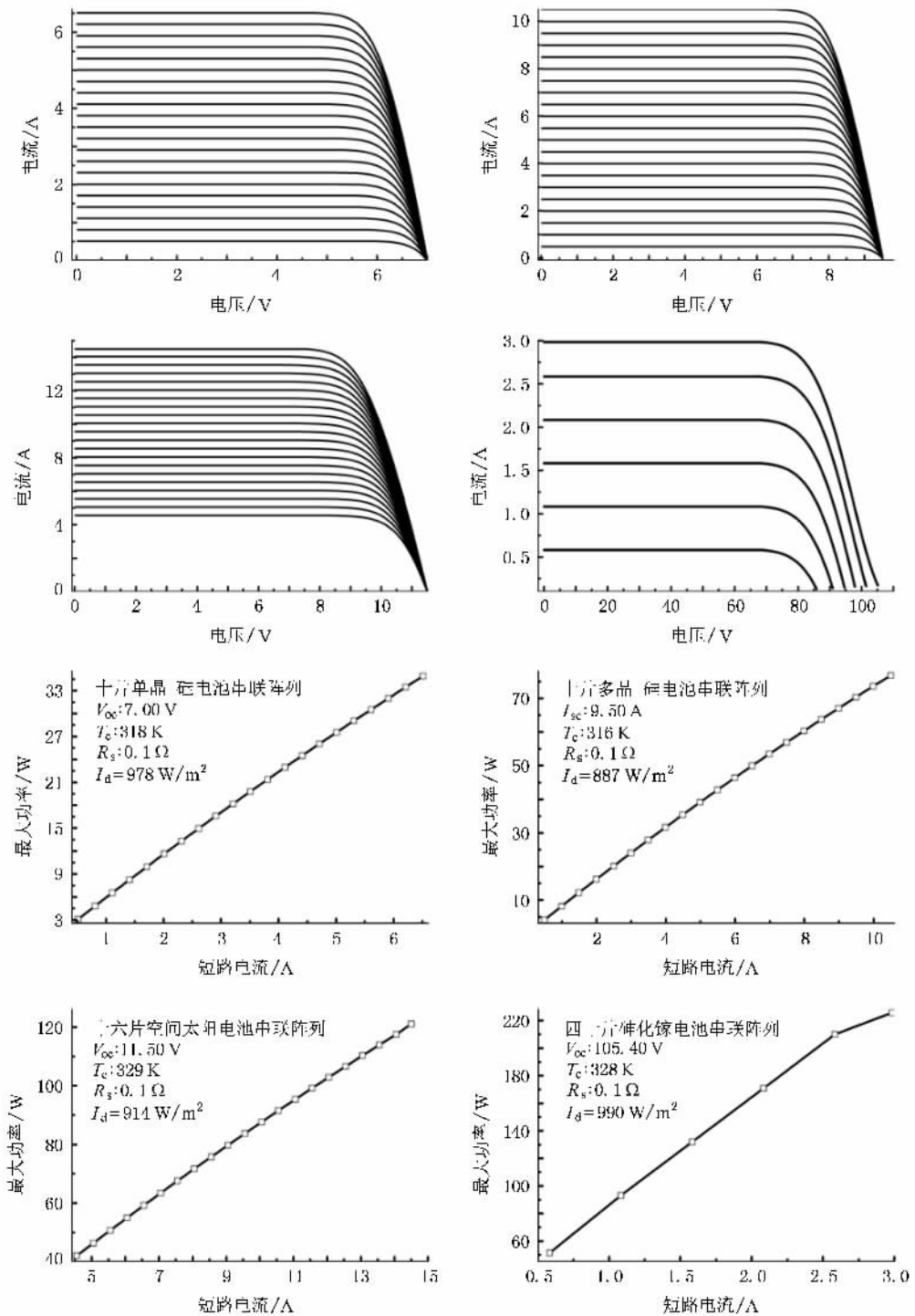


图 5 不同  $I_{sc}$  时四种电池阵列的  $I-V$  曲线和功率变化图

大,短路电流最小,串联电路中短路电流以单片电池最小短路电流输出,由图 7 可知,随着温度升高,电池阵列短路电流逐渐减少,晶硅电池阵列短路电流下降幅度大,砷化镓电池阵列短路电流下降小,温度每上升 1 K,单晶硅电池阵列短路电流下降 0.11818 A,多晶硅电池阵列短路电流下降 0.05364 A,空间

电池阵列短路电流下降 0.01387 A,砷化镓电池阵列短路电流下降 0.00215 A.工作温度升高后,四种电池阵列最大输出功率都下降.由表 2 可知,空间太阳能电池阵列输出功率受温度影响最小,温度上升 1 K,输出功率才下降 0.50414%,因为导热性能好,温度相对较稳定,输出功率受影响小,且其面积大,对外

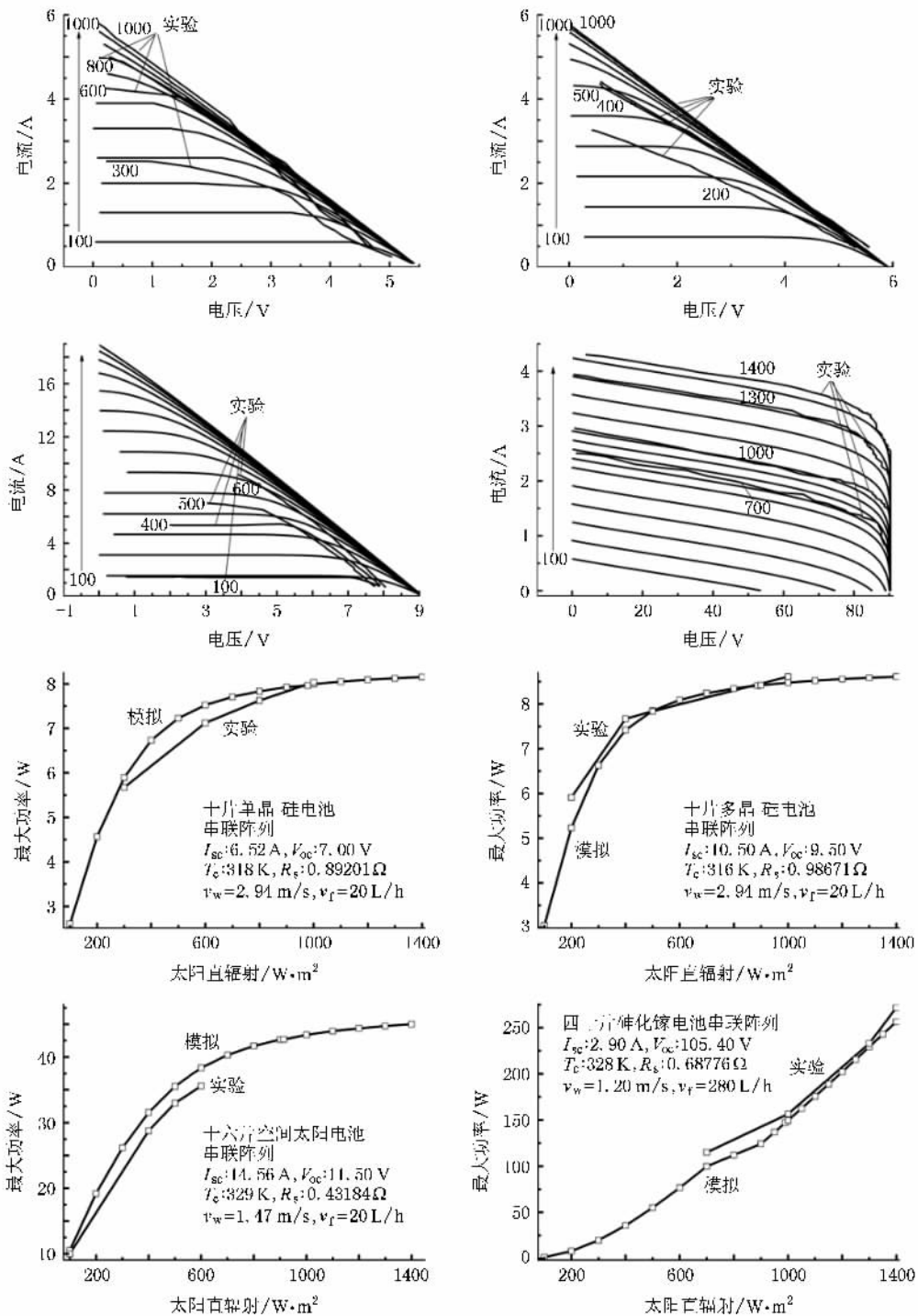


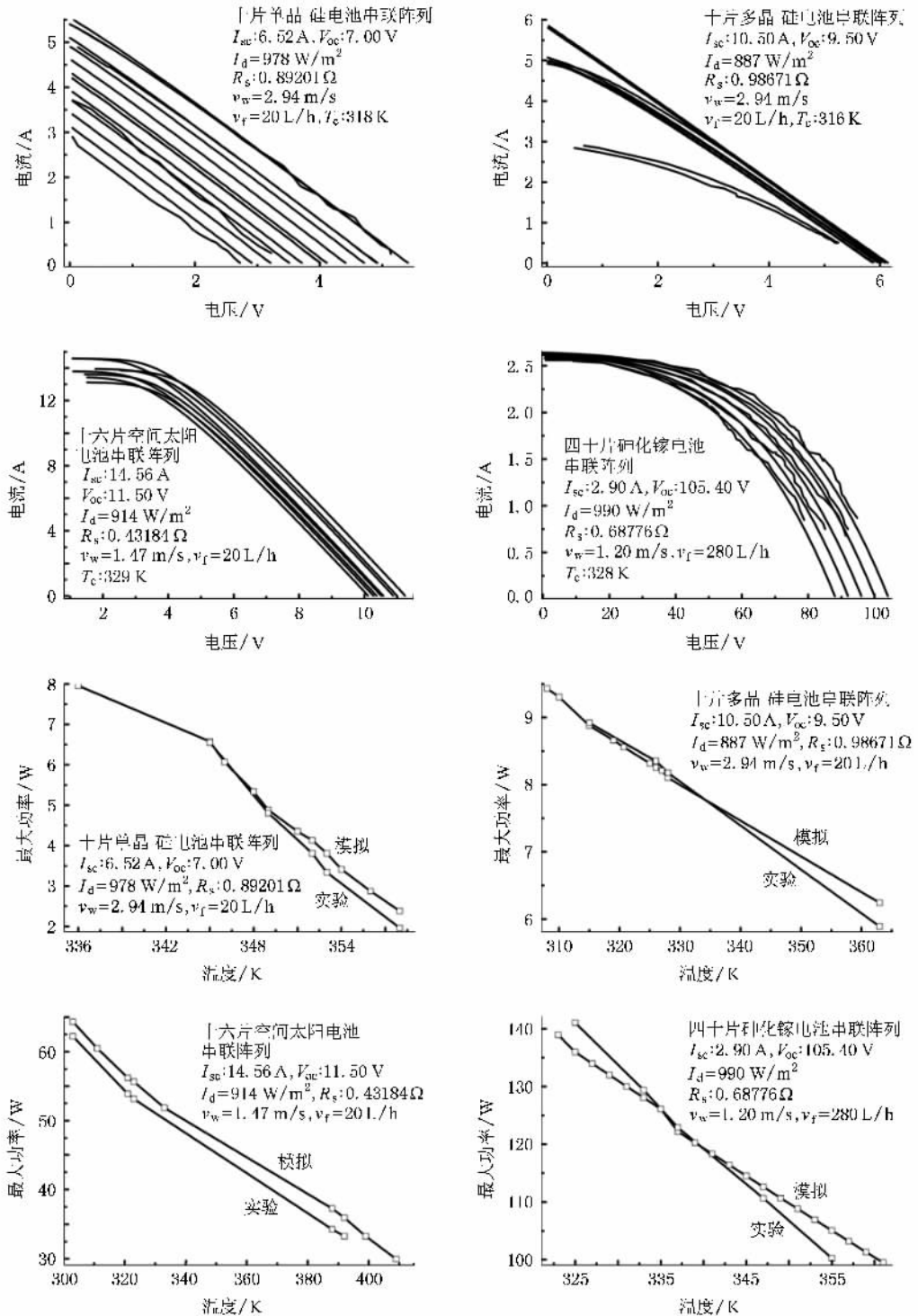
图 6 不同直射辐射时四种电池阵列的  $I-V$  曲线和功率变化图

辐射换热及与空气对流换热多 ;其次为砷化镓电池阵列 ,温度上升 1 K ,输出功率下降 0.74690% ,因为 GaAs 材料具有良好的高温性能 ,温度上升 1K ,多晶硅电池输出功率下降了 1.03778% ,输出功率受温度影响最大为单晶硅电池阵列 ,温度升高 1 K ,其输出功率下降了 3.18683% .

### 4. 结 论

高光强作用下四种光伏电池阵列的短路电流成倍增长 ,输出功率随着增加 ,因高光强带来其他影响因素都会减小电池阵列输出性能 ,其中串联内阻对



图7 不同工作温度时四种电池阵列的  $I-V$  曲线和功率变化图

电池阵列的输出性能影响巨大:串联内阻增加  $1 \Omega$ , 晶硅电池阵列的输出功率分别减少  $69.78\%$ ,  $74.93\%$  和  $77.30\%$ , 碲化镓电池阵列的输出功率也下降了  $58.01\%$ , 串联内阻对电池阵列输出性能的

影响应为聚光光伏系统设计和制作的重点之一,其他因素对电池阵列输出功率也有不同程度的影响,研究结果为聚光光伏发电系统光伏电池阵列的优化提供参考。

- [ 1 ] Chow T T 2003 *J. Sol. Energy* **74** 143
- [ 2 ] Zondag H A , Devries D W , Helden van W G , Zolingen van R J C , Steenhoven van AA J 2003 *J. Sol. Energy* **74** 253
- [ 3 ] Ji J , Lu J P , Chow T T , He W , Pei G He W 2007 *J. Appl. Energy* **84** 222
- [ 4 ] Garg H P , Agarwal P K 1995 *J. Energy Convers. Manage.* **36** 87
- [ 5 ] Fraisse G , Ménézo C , Johannes K 2007 *J. Sol. Energy* **81** 1426
- [ 6 ] Bergene T , Løvvik O M 1995 *J. Sol. Energy* **55** 453
- [ 7 ] Rosell J I , Vallverdú X , Lechón M A , Ibánñez 2005 *J. Energy Convers. Manage.* **46** 3034
- [ 8 ] Conventry J S 2005 *J. Sol. Energy* **78** 211
- [ 9 ] Tripanagnostopoulos Y , Nousia T , Souliotis M , Yianoulis P 2002 *J. Sol. Energy* **72** 217
- [ 10 ] Tripanagnostopoulos Y 2007 *J. Sol. Energy* **81** 1117
- [ 11 ] Tiwari Arvind , Sodha M S 2006 *J. Sol. Energy* **80** 751
- [ 12 ] Huang B J , Lin T H , Hung W C , Sun F S 2001 *J. Sol. Energy* **70** 443
- [ 13 ] Ge X S , Ye H 2006 *J. Acta Energetiae Sol. Sin.* **27** 30 ( in Chinese ) [ 葛新石、叶宏 2006 太阳能学报 **27** 30 ]
- [ 14 ] Zhai H , Dai Y J , Wu J Y 2007 *J. J. Eng. Thermophys.* **28** 725 ( in Chinese ) [ 翟辉、代言军、吴静怡 2007 工程热物理学报 **28** 725 ]
- [ 15 ] Ding J L , Cheng X F , Zhai Z T , Zha J , Mao M Q 2007 *J. Eng. Sci.* **9** 82 ( in Chinese ) [ 丁金磊、程晓航、翟载腾、查君、茆美琴 2007 中国工程科学 **9** 82 ]
- [ 16 ] Cheng X F , Li J , Yu S J 2004 *J. Acta Energetiae Sol. Sin.* **25** 345 ( in Chinese ) [ 程晓航、李坚、余世杰 2004 太阳能学报 **25** 345 ]
- [ 17 ] Xu Y F , Li M , Wang L L , He J H , Zhang X H , Wang Y F , Xiang M 2008 *J. Chin. J. Semicond.* **29** 2421 ( in Chinese ) [ 徐永锋、李明、王六玲、何建华、张兴华、王云峰、项明 2008 半导体学报 **29** 2421 ]
- [ 18 ] Zahler M , Morral F I , Ahn C G 2003 *A. Sol. Program Rev. Meeting* 723
- [ 19 ] Li B , Xiang X B , You Z P , Xu Y , Fei X Y 1995 *J. Chin. J. Semicond.* **16** 741 ( in Chinese ) [ 李标、向贤碧、游志朴、许颖、费雪英 1995 半导体学报 **16** 741 ]
- [ 20 ] Liu H X , Hao Y , Zhang T , Zheng X F , Ma X H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 984 ( in Chinese ) [ 刘红侠、郝跃、张涛、郑雪峰、马晓华 2003 物理学报 **52** 984 ]
- [ 21 ] Gao H L , Zeng Y P , Wang B Q , Zhu Z P , Wang Z G 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1119
- [ 22 ] Andreer A M , Grilikhes V A , Khvostikov V P , Khvostikova O A , Rumyanster V D , Sadchikov N A , Shvarts M Z. 2004 *J. Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* **84** 3

## The effect of concentrated light intensity on output performance of solar cell arrays<sup>\*</sup>

Xu Yong-Feng<sup>1)†</sup> Li Ming<sup>1)†</sup> Wang Liu-Ling<sup>2)</sup> Lin Wen-Xian<sup>1)</sup>  
Zhang Xing-Hua<sup>2)</sup> Xiang Ming<sup>2)</sup> Wang Yun-Feng<sup>2)</sup> Wei Sheng-Xian<sup>1)</sup>

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

2) *School of Physics and Electronic Information , Yunnan Normal University , Kunming 650092 , China )*

( Received 21 December 2008 ; revised manuscript received 17 March 2009 )

### Abstract

Detailed analysis on the output characteristic and power influence factors of crystal silicon solar cell arrays and GaAs cell arrays have been done based on trough concentrating photovoltaic/thermal system. The results show that under concentrated light intensity , the output performance of GaAs cell array is better than crystal silicon solar cell arrays. Band-gap of solar cell arrays narrows and short circuit current increases very much in concentrated light intensity , which are good for output power. But open circuit voltage of cells drops a little for high recombination rate in depletion region produced by high light intensity , which has a restrictive effect to output power. At the same time the series resistance of cell arrays increases and working temperature of cell arrays rises which are brought about by high concentrated light intensity. In high concentrated light intensity , series resistance of cell arrays hugely affect the output power. When series resistance increases from 0  $\Omega$  to 1  $\Omega$  , the out put power of four cell arrays respectively drop by 67.78% , 74.93% , 77.30% and 58.01% .

**Keywords :** photovoltaic/thermal system , solar cell array , series resistance , output power

**PACC :** 8630J , 7850G

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China ( Grant No. 2006AA05Z410 ) , the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2007CB216405 ) , the Natural Science Foundation of Yunnan province , China ( Grant Nos. 2007C0016Z and 2005E0031M ) , the Foundation of the Ministry of Education of China for Returned Scholars.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : mlldly@126.com