

文章编号: 1000-7032(2018)07-0974-09

高倍聚光模组系统研究与设计

黄 瑞, 郭丽敏, 刘友强, 王聪聪, 赵 明, 张晓宁, 张红梅, 王智勇, 曹银花*

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘要: 聚光系统的聚光效率和能量均匀性直接影响单位模组的发电效率。本文研究设计出高倍聚光模组系统,该系统主要包括菲涅耳透镜和球冠平顶微棱镜。采用中心波长修正法进行菲涅耳透镜的设计,并通过 Zemax 仿真模拟设计出球冠平顶微棱镜。最后通过 Zemax 模拟,决定选取两侧面夹角 α 的角度为 117° ,平顶到球面的间隔 g 为 0.2 mm ,球冠平顶微棱镜的曲率半径 R 为 10 mm 。聚光系统整体的聚光效率达 99.8% ,能量均匀度为 0.812 ,并进行实验验证,得出实际聚光效率为 83.1% 。

关键词: 聚光效率; 能量均匀性; 菲涅耳透镜; 球冠平顶微棱镜; Zemax

中图分类号: TN29 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20183907.0974

Research and Design of High Power Concentrator Module System

HUANG Rui, GUO Li-min, LIU You-qiang, WANG Cong-cong, ZHAO Ming,

ZHANG Xiao-ning, ZHANG Hong-mei, WANG Zhi-yong, CAO Yin-hua*

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

* Corresponding Author, E-mail: caoyh@bjut.edu.cn

Abstract: The concentrating efficiency and the energy uniformity of the concentrating system directly influence the generation efficiency of the unit module. In this paper, a high power condensing module system was studied. The system included a Fresnel lens and flat spherical micro prism. The Fresnel lens was designed by central wavelength correction method and through Zemax simulation, and the design of spherical flat lens was established. Finally, through the Zemax simulation, it is decided that the angle between the two sides is selected to be 117° , the distance g between the flat top and the spherical surface is 0.2 mm , and the curvature radius R of the spherical dome micro-prism is 10 mm . The condensing system as a whole has a condensing efficiency of 99.8% and an energy uniformity of 0.812 . Experimental results show that the actual condensing efficiency is 83.1% .

Key words: concentration efficiency; energy uniformity; Fresnel lens; spherical flat microprism; Zemax

1 引 言

高倍聚光太阳能技术旨在通过采用相对便宜的光学元件来取代大量昂贵的半导体材料以降低电力成本^[1]。虽然改进的余地仍然很大,但这种

技术在丰富的太阳能资源和有利的经济环境下已经显示出可喜的成果^[2]。梁齐兵等^[3]对某一特定的三结聚光电池进行电路网络建模计算,并分析菲涅耳透镜光斑强度分布和照射面积对电池的影响;付苓等^[4]针对能流分布的均匀性的问题,

设计了3种可改善聚光能量分布均匀性的二次聚光器;郭丽敏等^[5]成功设计出一种可拆卸的倒置的去掉顶部的棱锥形二次反射镜来提高聚光光伏接收角;杨光辉等^[6]对设计的二次均光元件进行了优化,输出功率提高了16%;闫素英等^[7]为了提高三结砷化镓太阳能电池芯片表面能流分布的均匀性,对菲涅耳高倍聚光PV/T系统采用正交试验法,得到光斑均匀性为89.11%、光学效率达89.29%。太阳能光伏发电依次经历了晶硅(单晶硅、多晶硅)发电技术、薄膜(CIGS、CdTe为代表)发电技术、以及第三代高倍聚光光伏(HCPV)技术。

与前两代发电技术相比,高倍聚光发电技术具有光电转换效率高^[8]、光谱吸收范围宽、温度适应性好、土地利用率高、环境友好等诸多优点,已经成为当今太阳能应用领域研究的热点课题。高倍聚光发电技术的关键在于聚光系统的性能,而聚光系统的性能又与单位模组的实际发电效率密切相关。聚光系统的聚光效率和能量均匀性直接影响单位模组的发电效率。本文研究和设计出菲涅耳透镜和球冠平顶微棱镜,来提高聚光系统的聚光效率和电池表面的能量均匀性。

2 理论分析

2.1 菲涅耳透镜的设计

菲涅耳透镜具有加工简单、体积小、重量轻等优点。它的设计不同于普通透镜^[9],主要采用近似有限元方法将大面积曲面透镜分成极小的环带,通过每个小环带的聚焦,最终达到聚焦的效果。本文利用边缘光线原理,即以最大入射角入射的光线可以达到电池片表面,就认为中间光线就可以入射到电池片表面。聚光系统主要考虑的是光线到达电池片表面的能量集中度和聚光效率,并不需要考虑成像质量。菲涅耳透镜的聚光原理如图1所示。

图中光线垂直入射到菲涅耳透镜的表面,光线方向不发生改变。当光线到达透镜的齿面时,光线会发生折射,折射后的光线到达太阳能电池表面。本文中设计的菲涅耳透镜厚度为2 mm,透镜的齿高 $y \leq 0.4$ mm。当齿高 $y \leq 0.4$ mm时,透镜齿之间的间隔为1 mm。当齿高 $y > 0.4$ mm时,需要调整齿间间隔和齿的角度来达到光线汇聚到电池片表面的目的。

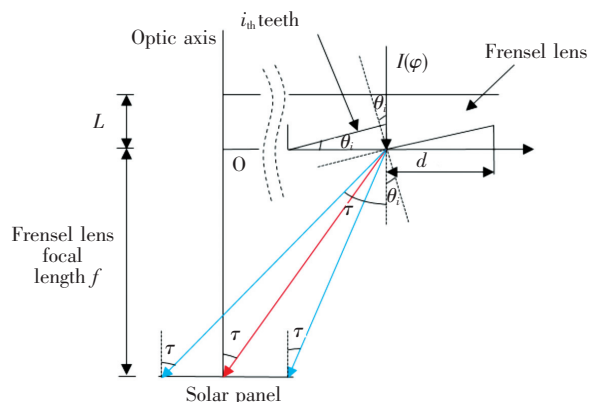


图1 菲涅耳透镜聚光原理图

Fig. 1 Fresnel lens condensing principle diagram

当齿高 $y > 0.4$ mm时,根据边缘光线原理,假设光线从齿的最左侧垂直入射下来,齿的最左侧到透镜圆心的距离为 P ,光线与齿面形成 θ_i 的角度,太阳能电池位于菲涅耳透镜的焦点 f 处,太阳能电池片的半径为 r ,由于电池片相较于菲涅耳透镜的焦距来说很小,可以将其视为一点,到达芯片上的光线与竖直方向所成的角度都为 τ ,所经过折射的光线方向偏转角度为 $(\tau + \theta_i)$,由几何关系可知,齿在水平方向也成 θ_i 的角度,菲涅耳透镜的折射率为 n ,空气的折射率为1,齿间间隔为 Δd 。

根据折射率定理可得:

$$n \sin \theta_i = \sin(\alpha + \theta_i), \quad (1)$$

又

$$\tan \tau = \frac{P}{f}, \quad (2)$$

可以求出 θ_i 的值,齿高 $y = 0.4$ mm,则齿间间隔为:

$$\Delta d = \frac{0.4}{\tan \theta_i}, \quad (3)$$

然后将 $(P + \Delta d)$ 作为下一个齿最左侧的距离,这个过程可以代入到Matlab中进行迭代,得出菲涅耳透镜各个齿间间隔和齿的角度的具体值。这样就可以设计出不同焦距的菲涅耳透镜满足应用需求。

2.2 球冠平顶微棱镜的设计

2.2.1 设计方案研究

球冠平顶微棱镜的结构如图2所示,棱镜的下面仍然采用正四棱锥的结构^[10],上面为球面和平面的组合,作为太阳光的入射面,小底面作为太阳光的出射面,小底面的面积与太阳能电池的面

积相当,4 个侧面为全反射工作面。为了减少反射能量损失,设计时要求光线在侧壁上发生一次全反射后就到达太阳能电池的接收面上。

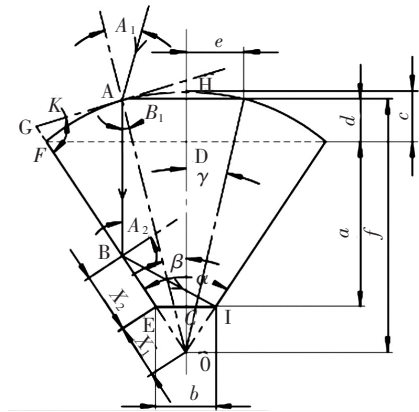


图 2 球冠平顶微棱镜结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the spherical flat microprism structure

设空气折射率为 n_1 , 球冠平顶微棱镜折射率为 n_2 , 参考折射定律和几何关系可知:

$$n_1 \sin A_1 = n_2 \sin B_1, \quad (4)$$

为保证光线在侧壁上能够全反射,则由全反射定律,可得

$$A_2 \geq \arcsin \frac{n_1}{n_2}, \quad (5)$$

设球冠平顶微棱镜两边与圆心的夹角为 α , 入射光线和球冠交点与球圆心的连线与 OH 的夹角为 β 。在 $\triangle ABO$ 中,由正弦定理可知,

$$\frac{R}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + A_2\right)} = \frac{x_1 + x_2}{\sin B_1}, \quad (6)$$

则

$$\frac{R}{\cos A_2} = \frac{x_1 + x_2}{\sin B_1}, \quad (7)$$

在 $\triangle EIO$ 中,由正弦定理可知,

$$\frac{b}{\sin \alpha} = \frac{x_1}{\sin\left(\frac{\pi - \alpha}{2}\right)}, \quad (8)$$

则

$$x_1 = \frac{b}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (9)$$

由公式(4)可知,

$$\sin B_1 = \frac{n_1 \sin A_1}{n_2}, \quad (10)$$

将公式(10)带入公式(7)得:

$$\frac{R}{\cos A_2} = \frac{n_2(x_1 + x_2)}{n_1 \sin A_1}, \quad (11)$$

则

$$\sin A_1 = \frac{n_2(x_1 + x_2) \cos A_2}{n_1 R}, \quad (12)$$

在 $\triangle BEI$ 中,由正弦定理可知,

$$\frac{b}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - A_2\right)} = \frac{x_2}{\sin\left(A_2 - \frac{\alpha}{2}\right)}, \quad (13)$$

则

$$x_2 = \frac{b \sin\left(A_2 - \frac{\alpha}{2}\right)}{\cos A_2}, \quad (14)$$

由公式(9)、(12)、(14)可得

$$\sin A_1 = \frac{n_2 \left[\frac{b}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{b \sin\left(A_2 - \frac{\alpha}{2}\right)}{\cos A_2} \right] \cos A_2}{n_1 R}, \quad (15)$$

光线在 B 点发生全反射,由全反射定理可知,

$$\sin A_2 = \frac{n_1}{n_2}, \quad (16)$$

$$A_2 \geq \arcsin \frac{n_1}{n_2}, \quad (17)$$

由公式(15)、(17)可得

$$A_1 \leq \arcsin \frac{n_2 b \cos\left(\arcsin \frac{n_1}{n_2} - \alpha\right)}{2 n_1 R \sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (18)$$

如图 2 所示,入射 A 点的光线,经 B 点反射到达 I 点,要求所有光线经过一次反射后能到达 EI 表面,则 BE 的长度 $x \leq x_2$,即入射角 $A \leq A_1$ 。

由几何关系可知,设球的半径是 R,球冠高 $h = a + c$, $L_{CD} = a$, $L_{DH} = c$, $L_{CD} = L_{OD} - L_{OC}$, $L_{OC} = \frac{b}{2} \tan \frac{\alpha}{2}$, $L_{OD} = R \cos \frac{\alpha}{2}$, 则:

$$a = R \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{b}{2} \tan \frac{\alpha}{2}, \quad (19)$$

由 $c = R\left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right)$, $h = a + c$, 可得

$$R \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{b}{2} \tan \frac{\alpha}{2} + R\left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) = R - \frac{b}{2} \tan \frac{\alpha}{2}. \quad (20)$$

根据公式(7)、(9)、(12)、(14)、(15)、(18)、

(20)就可以得出进入球冠平顶微棱镜球面处光线入射角与球冠二次镜 α 、 R 、 b 之间的参数要求, 从而保证了球冠平顶微棱镜球面处的聚光效果, 以此作为二次光学元件设计的理论依据。

球冠平顶微棱镜是将球冠顶磨平, 可以显著改善入射到太阳能电池片的能量均匀性。垂直入射到平顶的太阳光线没有经过侧面发射到达太阳能电池片上^[11]。

经过球冠平顶微棱镜的光线可直接到达电池片表面, 或经过侧面反射一次后到达电池接收面, 其聚光效果同微棱镜结构^[12], 即要求入射角为 A'_1 的光线需满足以下条件:

$$\pi - \alpha \geq \arcsin \frac{n_1}{n_2} + \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin A'_1 \right), \quad (21)$$

则

$$A'_1 \leq \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \sin \alpha \sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}} + \cos \alpha \right). \quad (22)$$

如图 2 所示, 设 A 点为球冠平顶的分割点, 由几何关系及公式 (17) 可知,

$$K = A_2 + B_1, \quad (23)$$

$$K \geq \arcsin \frac{n_1}{n_2} + \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin A_1 \right), \quad (24)$$

$$\beta \geq \frac{\alpha - \pi}{2} - \arcsin \frac{n_1}{n_2} - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin A_1 \right), \quad (25)$$

$$a = R \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{b}{2} \cot \frac{\alpha}{2}, \quad (26)$$

$$c = R - R \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (27)$$

$$e = R \sin \frac{\beta}{2}, \quad (28)$$

$$f = R \cos \frac{\beta}{2}, \quad (29)$$

$$d = f - a - \frac{b}{2} \cot \frac{\alpha}{2} = R \cos \frac{\beta}{2} - R \cos \frac{\alpha}{2} - b \cot \frac{\alpha}{2}, \quad (30)$$

由公式 (25) 和 (30) 可知

$$d \geq R \cos \frac{\frac{\alpha - \pi}{2} - \arcsin \frac{n_1}{n_2} - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin A_1 \right)}{2} - R \cos \frac{\alpha}{2} - b \cot \frac{\alpha}{2}, \quad (31)$$

由此可见, 入射角 A'_1 确定后, 即可求出球冠平顶

到球面棱边的距离 d 。

2.2.2 球冠平顶微棱镜模型

图 3 所示为球冠平顶微棱镜的三维模型示意图, 下底面边长为 b , 平顶到球面的距离为 g , 球面半径为 R , 球冠两侧面的夹角为 α 。

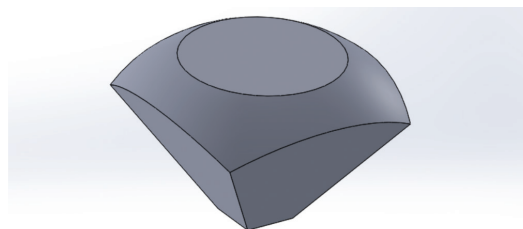


图 3 球冠平顶微棱镜三维模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the spherical flat micro prism 3D model

3 模拟与实验

3.1 576 倍模组聚光系统的设计模拟

我们可以将设计好的菲涅耳透镜和球冠平顶微棱镜的各项参数导入 Solidworks 中, 建立菲涅耳透镜和球冠平顶微棱镜组成的聚光系统三维模型, 结构如图 4 所示。

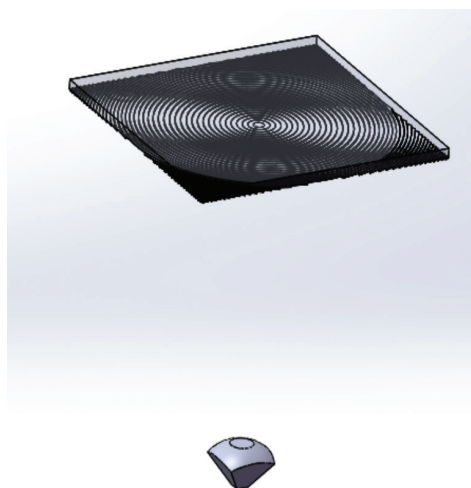


图 4 聚光系统的三维模型

Fig. 4 Three dimensional model of spotlight system

576 倍模组聚光系统由菲涅耳透镜和球冠平顶微棱镜组成^[13]。其中, 菲涅耳透镜的初始参数是厚度为 2 mm, 齿高 $y \leq 0.4$ mm 部分, 透镜齿之间的间隔为 1 mm; 齿高 $y = 0.4$ mm 的部分, 调整齿间间隔和齿的角度使得光线汇聚在电池片上。另外, 为了便于后期组装, 我们将圆形的菲涅耳透

镜切成其内接正方形,尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。576 倍模组聚光系统对应的菲涅耳透镜的焦距为 108 mm ,太阳能电池片的尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 。将设计好的聚光系统导入进 Zemax 系统中,利用 Zemax 的非序列模式进行聚光系统的光路分析。系统在 Zemax 中的结构如图 5 所示。

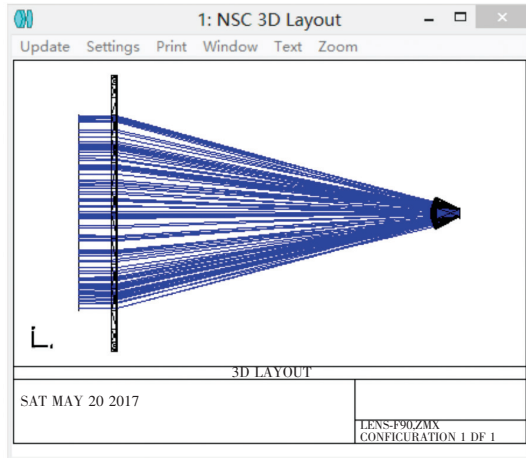


图 5 Zemax 中的聚光系统的光线模拟图

Fig. 5 Light simulation diagram of the spotlight system in Zemax

影响球冠平顶微棱镜的聚光效果主要有 3 个因素^[14]:平顶到球面的距离 g 、棱镜两侧面的夹角 α 以及球冠的半径 R 。下面我们将利用 Zemax 进行电池表面能量均匀性和接收效率的分析,采用控制变量法分别确定 3 个方面的值。最终设计出最佳的球冠微棱镜结构。其中菲涅耳透镜在 Zemax 中采用硅酮材料,球冠采用 K9 玻璃,Zemax 中模拟的总能量为 3.6 W 。

3.1.1 两侧面夹角 α 的优化

在研究两侧面夹角对球冠的影响过程中,我们保持平顶到球面的距离 $g = 0$,球冠的半径 $R = 9 \text{ mm}$,两侧面的夹角取 $100^\circ \sim 140^\circ$,每间隔 1° 取一个测量值。计算结果部分的能量值如表 1 所示;两面夹角与能量值之间的关系曲线,用 origin 软件画出,如图 6 所示。

软件仿真可得,当平顶到球面的距离 $g = 0$,球冠的半径 $R = 9 \text{ mm}$ 时,两侧面的夹角 α 为 112° 到 122° 之间时,到达太阳能电池片上的能量值比较高。同时,我们在模拟的过程中发现当只改变球冠平顶微棱镜的两侧面夹角时,探测器上光斑能量的均匀性并没有提高,而且计算得出的能量均匀度并不高。

表 1 不同两侧面夹角对应聚焦光斑能量值

Tab. 1 Energy value of focusing spot corresponding to different two side angles

两侧面夹角/ $^\circ$	能量/W
114	3.584
116	3.588
118	3.588
120	3.585
122	3.582
124	3.571
126	3.557
128	3.503

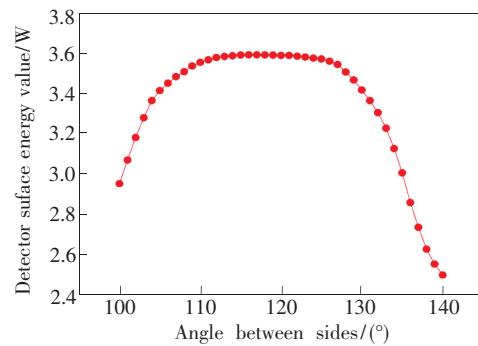


图 6 两侧面夹角与聚焦光斑能量值的对应关系

Fig. 6 Relationship between the angle of the two faces and the energy value of the focusing spot

3.1.2 曲率半径的优化设计

设球冠两侧面的夹角 α 为 120° ,平顶到球面的距离为 0 mm ,此时的球冠平顶微棱镜为球冠二次棱镜,对棱镜的曲率半径进行优化设计, R 的取值范围为 $7 \sim 14 \text{ mm}$,每隔 1 mm 测量一次,利用 Zemax 进行模拟计算,得出聚光能量值,测量出的值如表 2 所示;图 7 为曲率半径 R 与聚焦光斑能量值的对应关系。

根据变化曲线可知,曲率半径 R 越大,在电

表 2 不同曲率半径对应的聚焦光斑能量值

Tab. 2 Energy value of focusing spot corresponding to different radius of curvature

曲率半径/mm	能量/W
7	3.563
8	3.565
9	3.574
10	3.582
11	3.587
12	3.591
13	3.593
14	3.594

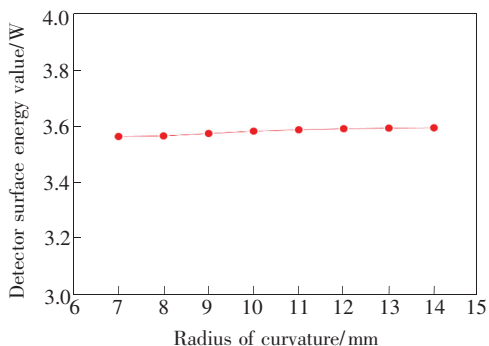


图 7 曲率半径与聚焦光斑能量值的对应关系

Fig.7 Corresponding relationship between curvature radius and energy intensity of focused spot

池片上的聚光能量值越高,但是当 $R > 9$ mm 时,能量随着曲率半径变化不大。考虑到加工方便等因素,曲率半径 R 取 10 mm。

3.1.3 平顶到球面间距 g 的优化

取球冠的曲率半径 R 为 10 mm,两侧面夹角 α 为 120° ,利用 Zemax 对球冠微棱镜的平顶到球面的间距进行模拟。平顶到球面的间距 g 从 0 取到 1 mm,模拟的聚焦光斑能量值如表 3 所示,用 origin 软件画出平顶到球面间距 g 与聚焦光斑能量值的变化曲线如图 8 所示。

从模拟的结果能够看出,平顶到球面的间距对系统的聚光效果影响明显。此外,在 Zemax 的

表 3 不同间隔 g 对应的聚焦光斑能量值

Tab.3 Energy value of focusing spot corresponding to different intervals

间距/mm	能量/W
0	3.588 7
0.1	3.589 7
0.2	3.590 1
0.3	3.589 1
0.4	3.586 8
0.5	3.576 2
0.6	3.548 5
0.7	3.487 9
0.8	3.422 3
0.9	3.372 3
1.0	3.329 9

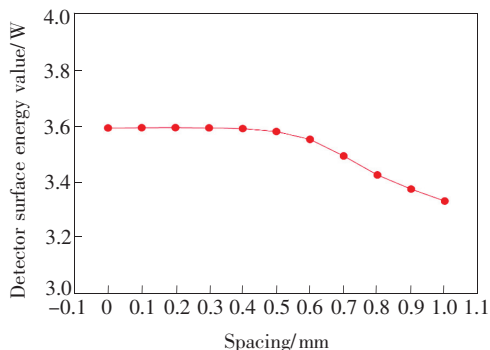


图 8 平顶到球面的间距与聚焦能量的对应关系

Fig.8 Relationship between the distance from flat top to spherical surface and focusing energy

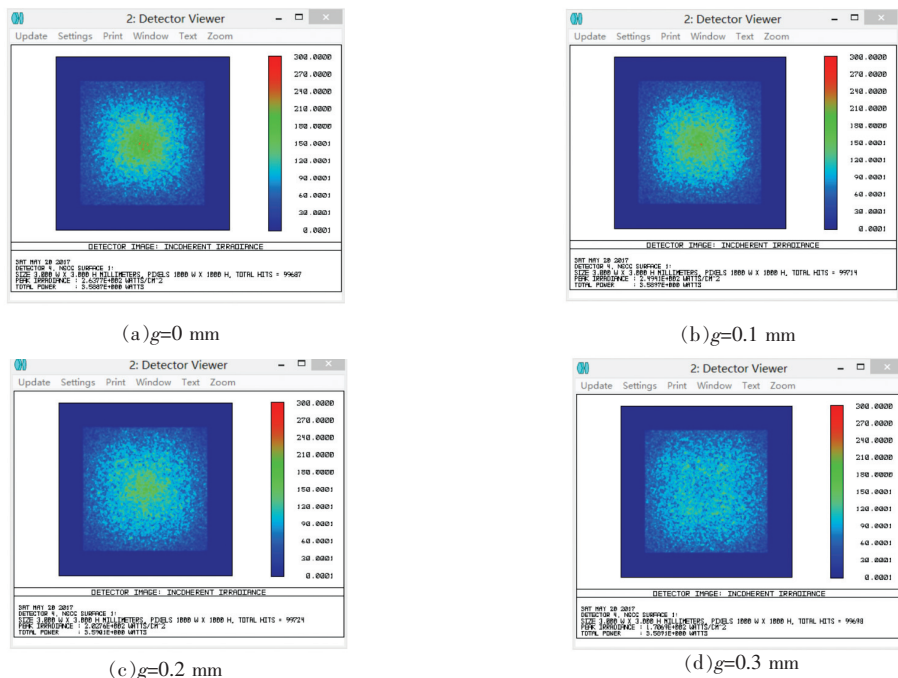


图 9 不同间距处对应的能量均匀性变化情况

Fig.9 Change of energy uniformity at different distances

模拟过程中,间距对入射到电池片的光线的均匀性也有较为明显的改变。这里我们选取间距 $g=0, 0.1, 0.2, 0.3$ mm 时,探测器上光线强度的分布情况如图 9 所示。综合聚光能量和聚光均匀性两方面考虑,我们取间隔 g 为 0.2 mm。

3.1.4 聚光系统整体优化设计

根据以上模拟确定球冠的曲率半径 $R=10$ mm,间隔 $g=0.2$ mm,球冠两侧面的夹角 α 为 $116^\circ \sim 120^\circ$,菲涅耳透镜的焦距为 108 mm。为了能够最终确定最佳的聚光系统,我们再次对两侧面夹角进行优化分析,不同角度对应的能量值如表 4 所示。同时我们也计算了在不同角度处,入射到探测器表面的能量均匀性的大小。聚焦光斑能量的均匀性为平均辐照度与最大辐照度之比,不同角度对应的能量均匀性的大小如表 5 所示。

表 4 不同角度对应的聚焦光斑能量值

Tab. 4 Energy value of focusing spot corresponding to different angles

侧面夹角/ $(^\circ)$	能量/W
116	3.584 7
117	3.588 1
118	3.590 3
119	3.591 5
120	3.591 9

表 5 不同角度对应的能量均匀性的大小

Tab. 5 Magnitude of energy uniformity corresponding to different angles

侧面夹角/ $(^\circ)$	能量均匀性
116	0.734
117	0.812
118	0.783
119	0.782
120	0.781

综合考虑聚焦光斑能量值和能量均匀性两个因素,决定选取两侧面夹角 α 的角度为 117° ,平顶到球面的间隔 g 为 0.2 mm,球冠平顶微棱镜的曲率半径 R 为 10 mm。此时,Zemax 模拟的总能量为 3.6 W,测出的能量为 3.588 1 W,因此理论聚光效率为 99.7%。

3.2 聚光系统实验研究

3.2.1 实验对象确定

我们根据仿真模拟确定球冠平顶微棱镜相关参数,研制出球冠平顶微棱镜,它的实物图如图

10 所示;并在此基础上,研制出高倍聚光模組的实际产品,如图 11 所示。

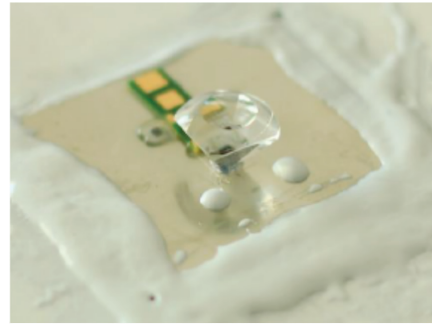


图 10 球冠平顶微棱镜的实物图

Fig. 10 Flat spherical micro prism physical map



图 11 高倍聚光模组实物图

Fig. 11 Object diagram of high power condensing module

3.2.2 实验方案和结果

本文采用高聚光型太阳能组件室内测试系统来对聚光模组进行静态效率 $I-V$ 测试^[15]。高聚光

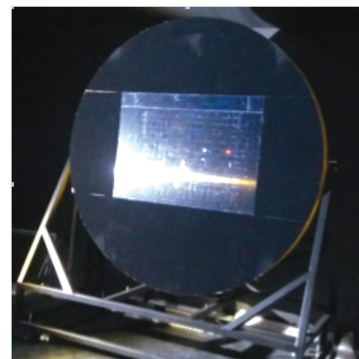
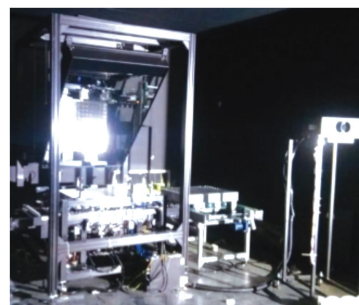


图 12 聚光模组测试系统

Fig. 12 Test system of CPV module

型太阳能组件室内测试系统由闪光发光器件、反射光板、模组功率测试仪等组成。系统专门配备有相应的测试软件, 用来记录数据。我们对 579 倍聚光模组进行测试, 所用的太阳能电池效率为 40%, 光强设置为 850 W/m^2 , 温度为常温 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。将发电模组放入测试机台如图 12 中, 即可进行发电单元的最大输出功率 E_{max} 测试, 共测试 10 次, 测试结果如表 6 所示, 典型 I - V 测试曲线如图 13 所示。

从图中可以看出, 测试结果的最大平均输出功率为 135.6 W 。太阳能电池效率为 40%, 光强设置为 850 W/m^2 , 可以计算出聚光系统的聚光效率为 83.1%。但由于存在棱镜的透过损失、菲涅耳透镜加工的误差以及光学元件折射率分布不均匀等因素影响, 实际的聚光效率比理论的聚光效

表 6 输出功率测试结果

Tab. 6 Test results of output power

次数	E_{max}/W
1	134.8
2	135.2
3	136.1
4	135.4
5	135.4
6	135.3
7	135.8
8	135.6
9	135.8
10	136.4

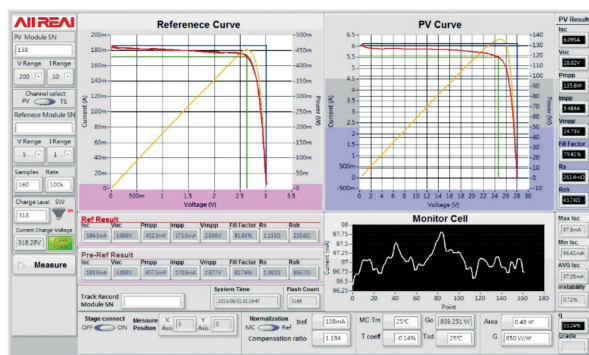


图 13 典型的 I - V 测试曲线

Fig. 13 Typical I - V test curve

率小, 这符合实际情况。同时入射在太阳能电池片的能量均匀性为 0.812。

4 结 论

本文研究和设计了一种高倍聚光发电模组, 分别对模组中的菲涅耳透镜和球冠平棱镜进行研究。确定了菲涅耳透镜的具体设计参数, 并分别讨论了球冠平顶微棱镜的曲率半径、两侧面夹角和平顶到球面的间隔对棱镜聚光能力的影响。最终决定选取两侧面夹角为 117° , 平顶到球面的间隔为 0.2 mm , 球冠平顶微棱镜的曲率半径为 10 mm 。模拟测出系统的聚光效率为 99.7%, 能量均匀性为 0.812。最后进行实验, 实际测出的聚光效率为 83.1%。

参 考 文 献:

[1] PÉREZ-HIGUERAS P, FERNÁNDEZ E F. *High Concentrator Photovoltaics: Fundamentals, Engineering and Power Plants* [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2015.

[2] TALAVERA D L, FERRER-RODRÍGUEZ J P, PÉREZ-HIGUERAS P, *et al.*. A worldwide assessment of levelised cost of electricity of HCPV systems [J]. *Energy Convers Manage*, 2016, 127:679-692.

[3] 梁齐兵, 舒碧芬, 孙丽娟, 等. 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 [J]. *物理学报*, 2014, 63(16):168801.

LIANG Q B, SHU B F, SUN L J, *et al.*. Optimization of spot intensity and coverage ratio of three-junction solar cells under non-uniform illumination [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2014, 63(16):168801. (in Chinese)

[4] FU L, LEUTZ R, ANNEN H P. Evaluation and comparison of different designs and materials for Fresnel lens-based solar concentrators [J]. *SPIE*, 2011, 8124:81240E1-6.

[5] 郭丽敏, 卫明, 杨光辉, 等. 高倍聚光光伏可拆卸型二次反射镜设计与研究 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S2):422-425.

GUO L M, WEI M, YANG G H, *et al.*. Design and research of high-power condenser photovoltaic detachable secondary mirror [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2013, 42(S2):422-425. (in Chinese)

[6] 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):322006.

- YANG G H, LIU Y Q, YAO S, *et al.*. Optimized design and research of secondary optics for concentrating modules [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2015, 35(3):322006. (in Chinese)
- [7] 闫素英, 李洪阳, 马靖, 等. 菲涅尔高倍聚光 PV/T 系统的均光优化与热特性研究 [J]. *应用科技*, 2016(4): 21-26.
- YAN S Y, LI H Y, MA J, *et al.*. Study on the optimization of uniform light and thermal properties of fresnel high-power concentrating PV/T system [J]. *Appl. Sci. Technol.*, 2016(4):21-26. (in Chinese)
- [8] 杨光辉. 密集矩阵高倍聚光光伏模组关键技术研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2015.
- YANG G H. *Research on Key Technologies of Dense Matrix High Power Concentrating Photovoltaic Modules* [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [9] 曹玉岩, 王志臣, 周超, 等. 光学元件挠性支撑结构广义建模及优化设计 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2793-2803.
- CAO Y Y, WANG Z C, ZHOU C, *et al.*. Generalized modeling and optimum design of flexible support structure for optical components [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11):2793-2803. (in Chinese)
- [10] 王红睿, 李会端, 方伟. 航天太阳敏感器的应用与发展 [J]. *中国光学*, 2013, 6(4):481-489.
- WANG H R, LI H D, FANG W. Application and development of space solar sensors [J]. *Chin. Opt.*, 2013, 6(4): 481-489. (in Chinese)
- [11] 刘华, 卢振武, 朱瑞, 等. 聚光光伏系统的发展及未来趋势 [J]. *中国光学*, 2008, 1(Z1):49-56.
- LIU H, LU Z W, ZHU R, *et al.*. The development and future trends of concentrated photovoltaic systems [J]. *Chin. Opt.*, 2008, 1(Z1):49-56. (in Chinese)
- [12] 胡雪花, 李福山, 吴朝兴, 等. 基底温度对喷涂技术制备大面积有机太阳能电池性能的影响 [J]. *发光学报*, 2013, 34(12):1641-1645.
- HU X X, LI F S, WU C X, *et al.*. Effects of substrate temperature on the performance of large area organic solar cells fabricated by spraying techniques [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(12):1641-1645. (in Chinese)
- [13] 叶金晶, 周健, 卞洁玉, 等. 晶硅太阳能电池原位光老化及热致输运机理 [J]. *光子学报*, 2016, 45(9):111-116.
- YE J J, ZOU J, YU J Y, *et al.*. *In-situ* photoaging and heat-induced transport mechanism of crystalline silicon solar cells [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2016, 45(9):111-116. (in Chinese)
- [14] 李梦庆, 张雷, 李宗轩, 等. 空间平面反射镜组件销钉预紧的非线性分析 [J]. *光子学报*, 2016, 45(2):140-145.
- LI M Q, ZHANG L, LI Z X, *et al.*. Nonlinear analysis of pin pre-tightening of spatial plane mirror components [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2016, 45(2):140-145. (in Chinese)
- [15] 许贺菊, 张彬, 张瑜, 等. 基于薄膜退火的 MoS₂/SiO₂/Si 异质结太阳能电池光伏性能提高 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3):597-602.
- XU H J, ZHANG B, ZHANG Y, *et al.*. Photovoltaic performance improvement of MoS₂/SiO₂/Si heterojunction solar cells based on thin film annealing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3):597-602. (in Chinese)



黄瑞(1992-),男,江苏宿迁人,硕士研究生,2016年于江苏大学获得学士学位,主要从事太阳能光伏、硅基外延生长的研究。
E-mail: 1242103764@qq.com



曹银花(1964-),女,吉林长春人,博士,研究员,2005年于北京理工大学获得博士学位,主要从事大功率半导体激光器的研究。
E-mail: caoyh@bjut.edu.cn