

一种环面焦斑菲涅耳聚光器的设计与分析

张丽 陈志明 董前民 梁培

(中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 在聚光光伏系统中,聚光光斑辐照度的不均匀性会降低光伏系统的光电转换效率,且会在光伏电池表面形成热斑效应,灼伤光伏电池。基于多焦点方法,设计了一种环形焦斑菲涅耳太阳能聚光镜,每环小透镜在焦平面上具有一个环面焦斑,且环面焦斑在接受面上均匀依次排列,实现均匀聚光。以口径 400 mm,具有 200 环,焦斑半径 20 mm, F 数为 0.8 的圆状环面焦斑菲涅耳聚光器为实例,用 TracePro 模拟平行太阳光垂直照射下时的照度图,得到其理想光学效率为 86.77%,光能均匀度为 0.8,表明环状焦斑菲涅耳聚光器具有较高的光能利用率和照明均匀性。分析了焦斑均匀性与聚光器 F 数的关系,当 F 数一定时,焦斑均匀性随着聚光器口径的增大而逐渐降低。

关键词 光学设计;能量均匀性;多焦点设计;菲涅耳透镜;环面焦斑

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.092201

Design and Analysis of Ring-Shaped-Focus Fresnel Concentrator

Zhang Li Chen Zhiming Dong Qianmin Liang Pei

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University,
Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract The non-uniform illumination distribution on the solar cell will reduce the solar-to-electric power conversion efficiency and decrease the service life of the cell in concentration photovoltaic system. Moreover, the hot-spots formed on the cell surface will quickly break the cell. Based on multifocal method, we design the ring-shaped-focus Fresnel concentrator, in which each ring of the Fresnel lens has one focus. Taking a Fresnel concentrator whose diameter is 400 mm, ring number is 200 and focused spot radius is 20 mm as an example, under simulated sunlight, using Tracepro software we get an illumination diagram with energy uniform by distributed on the round surface. The optical efficiency is 85.24% and the homogenization is 0.8. The annular focal spot Fresnel concentrator holds higher light utilization and illumination uniformity. Moreover, when the F number is fixed, the focal spot uniformity gradually reduces with the increase of the concentrator diameter.

Key words optical design; energy uniformity; multifocal design; Fresnel lens; annular focal spot

OCIS codes 220.1250; 220.1770; 220.2740; 220.3620

1 引言

要实现高效的太阳能光热、光电转换,太阳能聚光系统是必不可少的^[1]。将菲涅耳聚光器用于太阳能聚光系统可以减少太阳能电池的使用面积进而降低成本、提高太阳能的利用效率,但利用传统菲涅耳聚光器进行聚光发电的一个突出问题是,当太阳光经过透镜会聚后照射在太阳能电池表面上的光强分布不均匀,导致太阳能电池组件的发电效率降低^[2]。因此,有必要对菲涅耳聚光器光斑能量进行均匀化。

目前,实现菲涅耳透镜均匀聚光有两种方法:1)设计多焦点菲涅耳透镜;2)加载二次光学镜。二次光学镜利用光路在前进过程中全反射的原理来进行光路调整^[3]。二次聚光器的引入可以大大提高光斑强度分布的均匀性,但相比多焦点透镜,设计过程复杂,安装难度大,且光线每反射一次都会有约 4% 的能量损

收稿日期: 2012-04-24; **收到修改稿日期**: 2012-05-14; **网络出版日期**: 2012-06-26

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y407370)资助课题。

作者简介: 张丽(1987—),女,硕士研究生,主要从事太阳能光伏技术方面的研究。E-mail: alenele@163.com

导师简介: 董前民(1971—),男,博士,副教授,主要从事光纤非线性光学、激光光谱、光电功能材料方面的研究。

E-mail: qmdong@cjlu.edu.com(通信联系人)

失^[4,5],由此引起的光学损失在一定程度上会降低聚光系统的光学效率^[6]。多焦点是相对于单焦点而言的,针对多焦点聚光器,Vazquez-Molini等^[7~9]将菲涅耳透镜表面设计成具有不同焦点的几部分,改变几个焦点的位置,实现均匀聚光。相比普通共焦的菲涅耳聚光器,多焦点聚光器的辐照度均匀度明显提高,但存在一些缺点:焦点数目有限,相邻两焦点之间的能量密度小,影响能量均匀度;加工工艺复杂,需要分别制作几块透镜,制作成本高。为进一步提高光斑能量均匀性,本文设计了一种环面焦斑菲涅耳聚光器,让聚光器的每环透镜在焦平面上形成一个环面焦斑,且环面焦斑在焦平面上均匀排列,环面焦斑数等于环数,用来实现能量的均匀化。

2 设计方法

环面焦斑菲涅耳聚光器的每环小透镜在焦平面上形成一个环面焦斑,即将直径为 D 的圆状菲涅耳聚光器上的入射光线均匀会聚到直径为 d 的圆接收面上。其光路图如图 1 所示。

当平行光垂直入射在透镜的平面一侧时,聚光器第 i 环 x_i 位置上的入射光线会聚在以焦平面中心为圆心, r_i 为半径的圆上,如图 2 所示。由图 1,2 可知:

$$n \sin \theta_i = \sin \theta'_i, \quad (1)$$

$$\tan u_i = \frac{L_i}{f - k_i/2}, \quad (2)$$

$$k_i = \Delta R \times \tan \theta_i, \quad (3)$$

$$u_i = \theta_i - \theta'_i, \quad (4)$$

$$r_i = \frac{r \cdot \Delta R}{R} \cdot i, \quad (5)$$

$$L_i = x_i - r_i. \quad (6)$$

式中 n 为透镜的折射率, θ_i 为棱高度角, θ'_i 为出射面的折射角, u_i 为出射面的孔径角, k_i 为棱高, r 为焦斑半径, ΔR 为环面宽度, x_i 表示聚光器上第 i 环上入射光的位置, L_i 表示入射光与其光轴的距离,简称光轴距离, f 为焦距, r_i 为第 i 环透镜光轴与聚光器光轴的距离, R 为聚光器半口径, r 为焦斑半径。根据(1)~(6)式,可计算出透镜每一环的特征参数 k_i 。

环面焦斑菲涅耳聚光器的参数设计为:大口径 400 mm^[10],焦斑半径 20 mm, F 数为 0.8,厚度 3 mm,环距 1 mm,PMMA 材料,折射率是 1.49(理论上该种材料的透射率可以达到 90%以上^[11]),出射面压槽沟的平板型^[12]菲涅耳透镜。分析此环面焦斑菲涅耳聚光器的棱高,并对比相同参数下点聚焦菲涅耳聚光器的棱高,如图 3 所示。

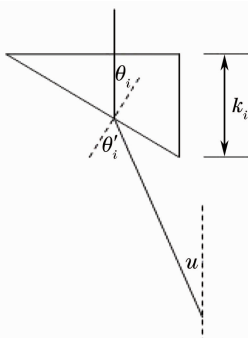


图 2 第 i 环透镜局部图

Fig. 2 Partial schematic of the i th theiring

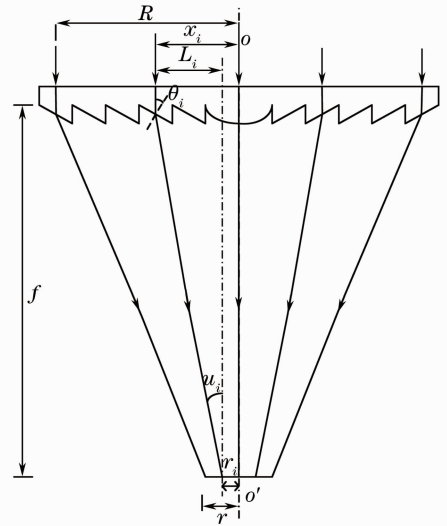


图 1 环面焦斑菲涅耳聚光器光路图

Fig. 1 Optical path of the ring-shaped-focus Fresnel concentrator

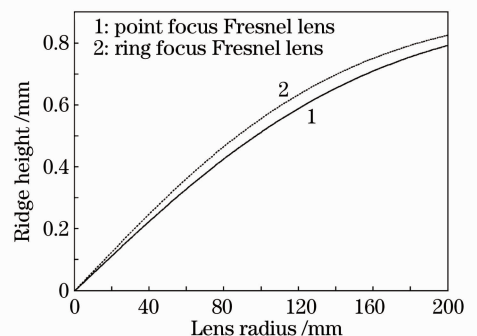


图 3 棱高变化趋势

Fig. 3 Variation of ridge height

图 3 表明:环面聚焦菲涅耳透镜的环深度随着环半径增大而增大,且在相同结构参数下,环面聚焦菲涅耳透镜各环的棱深度小于点聚焦菲涅耳透镜各环的棱深度。

3 建模

根据图 3 中计算的菲涅耳聚光器每一环的特征参数 k_i ,用三维制图软件 Pro/E 建立环状焦斑的菲涅耳透镜模型,图 4 为其示意图。

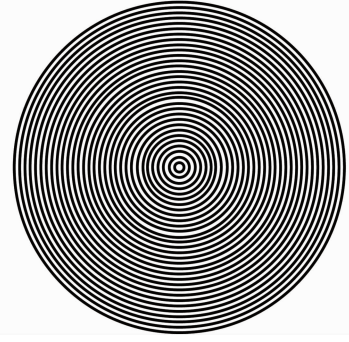


图 4 环面焦斑菲涅耳透镜示意图

Fig. 4 Sketch map of the ring-shaped-focus Fresnel lens

4 光学效率分析

聚光器的光学效率是指透镜中透射光的总能量与入射光的总能量之比,而透镜的光学效率与透镜的光学损失密切相关,导致菲涅耳透镜光学损失的原因很多。大致可以分为反射损失、吸收损失、工艺性损失等,其中工艺性损失主要指拔模角、圆角减少了聚光器的光能接收面积,从而降低了光学效率。

以太阳光作为光源[以美国国家航空航天局(NASA)太阳光谱与材料参数为标准,如表 1 所示],分别分析考虑拔模角、圆角^[7]的影响时,环面焦斑菲涅耳聚光器的透射率如图 5,6 所示。图中理想透射率指只考虑反射损失和材料吸收损失时环面焦斑菲涅耳聚光器的透射率。

表 1 NASA 太阳光谱与材料参数

Table 1 NASA solar spectrum and material parameters

$\Delta\lambda_i$	λ_i	W_i	n_i	T_i
0.259~0.40	0.374	0.0267	1.5250	0.962
0.40~0.43	0.416	0.0275	1.5155	1
0.43~0.45	0.441	0.0244	1.5081	1
0.45~0.47	0.460	0.0291	1.4999	1
0.47~0.49	0.480	0.032	1.4982	1
0.49~0.51	0.500	0.0327	1.4968	1
0.51~0.53	0.520	0.0323	1.4954	1
0.53~0.55	0.540	0.0322	1.4942	1
0.55~0.57	0.560	0.0319	1.4930	1
0.57~0.60	0.585	0.0473	1.4918	1
0.60~0.63	0.615	0.0473	1.4906	1
0.63~0.66	0.645	0.0475	1.4895	1
0.66~0.69	0.675	0.0456	1.4886	1
0.69~0.73	0.709	0.0537	1.4876	1
0.73~0.78	0.753	0.0591	1.4865	1
0.78~0.83	0.804	0.0562	1.4854	1
0.83~0.89	0.857	0.0623	1.4845	1
0.89~0.99	0.953	0.0606	1.4832	1
0.99~1.06	1.024	0.0565	1.4826	1
1.06~1.21	1.129	0.0621	1.4818	0.948
1.21~1.52	1.274	0.0649	1.4812(estimated value)	0.912
1.52~2.20	1.642	0.0681	1.4808(estimated value)	0.570

图 5,6 表明:在太阳光照射下,环面聚焦菲涅耳聚光器的透射率随着 F 数的增大而逐渐增大,且存在一个极限最小值 F 数为 0.425,在 F 数为 0.8 时,透射率为 86.77%。而且,相比 Davis 等^[13~15]研究的菲涅耳透镜,多环面焦斑菲涅耳聚光器具有更高的光学效率;随着拔模角、圆角的增大,聚光器的透射率直接降低,但在 F 数小于 0.5 时,拔模角和圆角对透射率的影响很小。

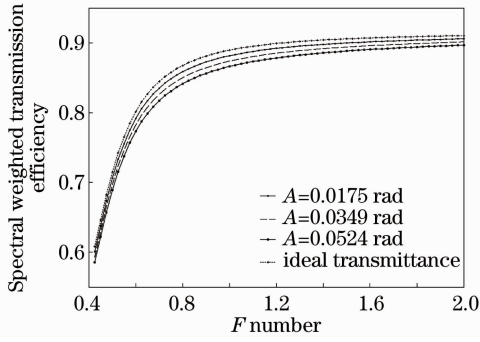


图 5 不同拔模角对透射率的影响

Fig. 5 Losses due to draft angle

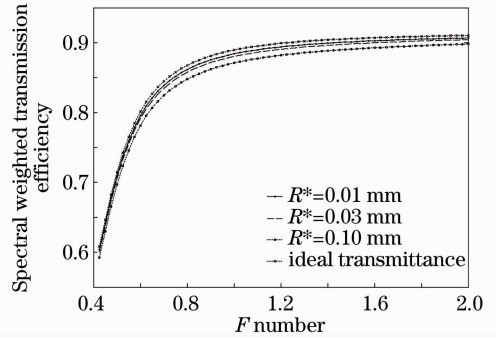


图 6 不同圆角对透射率的影响

Fig. 6 Losses due to rounded angle

5 焦斑模拟

5.1 环面焦斑的宽度

在平行单色光垂直照射下,环面焦斑菲涅耳聚光器每环的环面焦斑宽度等于环面的宽度,焦斑均匀分布在焦平面上,焦平面上的能量均匀度较好。但聚光光伏系统中以太阳光为光源,不同波长的光在 PMMA 中的折射率不同,由于色散的影响,光线经过菲涅耳聚光器后,不同波段的光线偏折方向不同,导致每环透镜的环面焦斑宽度不同,如图 7 所示。图 8 为环面焦斑示意图。

由图 7 可知:

$$\sin \theta_{1i} = \sin(n_1 \times \sin \theta_i), \quad (7)$$

$$S_{1i} = \tan(\theta_{1i} - \theta_i) \times (f - k_i) - \{L_i - [x_i - (i - 1)]\}, \quad (8)$$

$$\sin \theta_{2i} = \sin(n_2 \times \sin \theta_i), \quad (9)$$

$$S_{2i} = (i - r_i) - f \times \tan(\theta_{2i} - \theta_i), \quad (10)$$

$$S_i = S_{1i} + S_{2i}, \quad (11)$$

式中 n_1 为太阳光中最短波长的光 λ_1 对应的 PMMA 折射率, n_2 为太阳光中最长波长的光 λ_2 对应的 PMMA 折射率, S_{1i} 表示环上最内圈位置上最大的焦斑宽度, S_{2i} 表示环上最外圈位置上最大的焦斑宽度, S_{1i} 与 S_{2i} 之和为环面焦斑宽度 S_i 。根据(7)~(11)式,分析 S_i 和 r_i 随环半径的变化趋势,结果如图 9 所示。

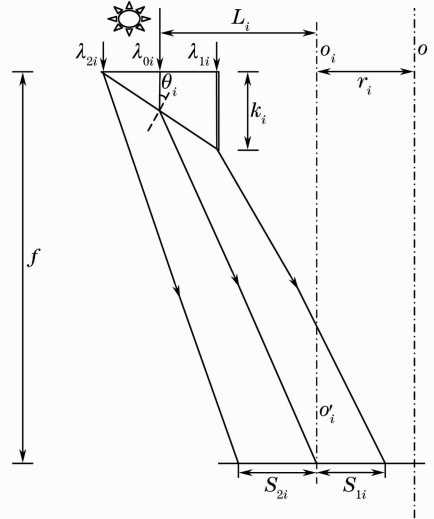


图 7 环面焦斑的宽度

Fig. 7 Width of the ring focal spot

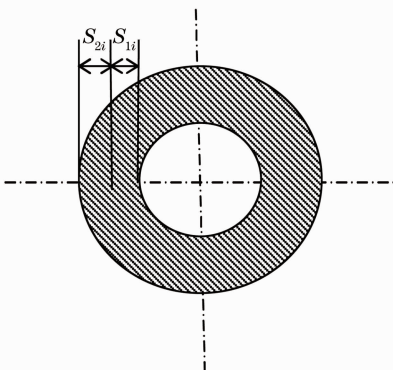


图 8 环面焦斑示意图

Fig. 8 Schematic map of the ring-shaped focus

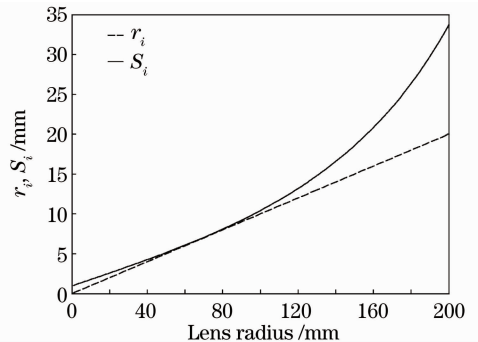


图 9 环面焦斑的位置和宽度

Fig. 9 Position r_i and width S_i of ring focus versus lens radius

图 9 表明:在太阳光照射下,当焦距 f 一定时,环面焦斑的位置 r_i 与环半径呈线性关系,但环面焦斑宽度与环半径呈非线性关系,且斜率随环半径增大而逐渐增大。因此,当 f 一定时,多环面焦斑聚光器焦斑的能量密度随着聚光器口径的增大而逐渐降低,焦斑均匀性逐渐降低。

5.2 光斑模拟

分别模拟不同光照下环面焦斑菲涅耳聚光器的照度图,光源辐照度 E 为 1000 W/m^2 ,如图 10(a)~(i) 所示。

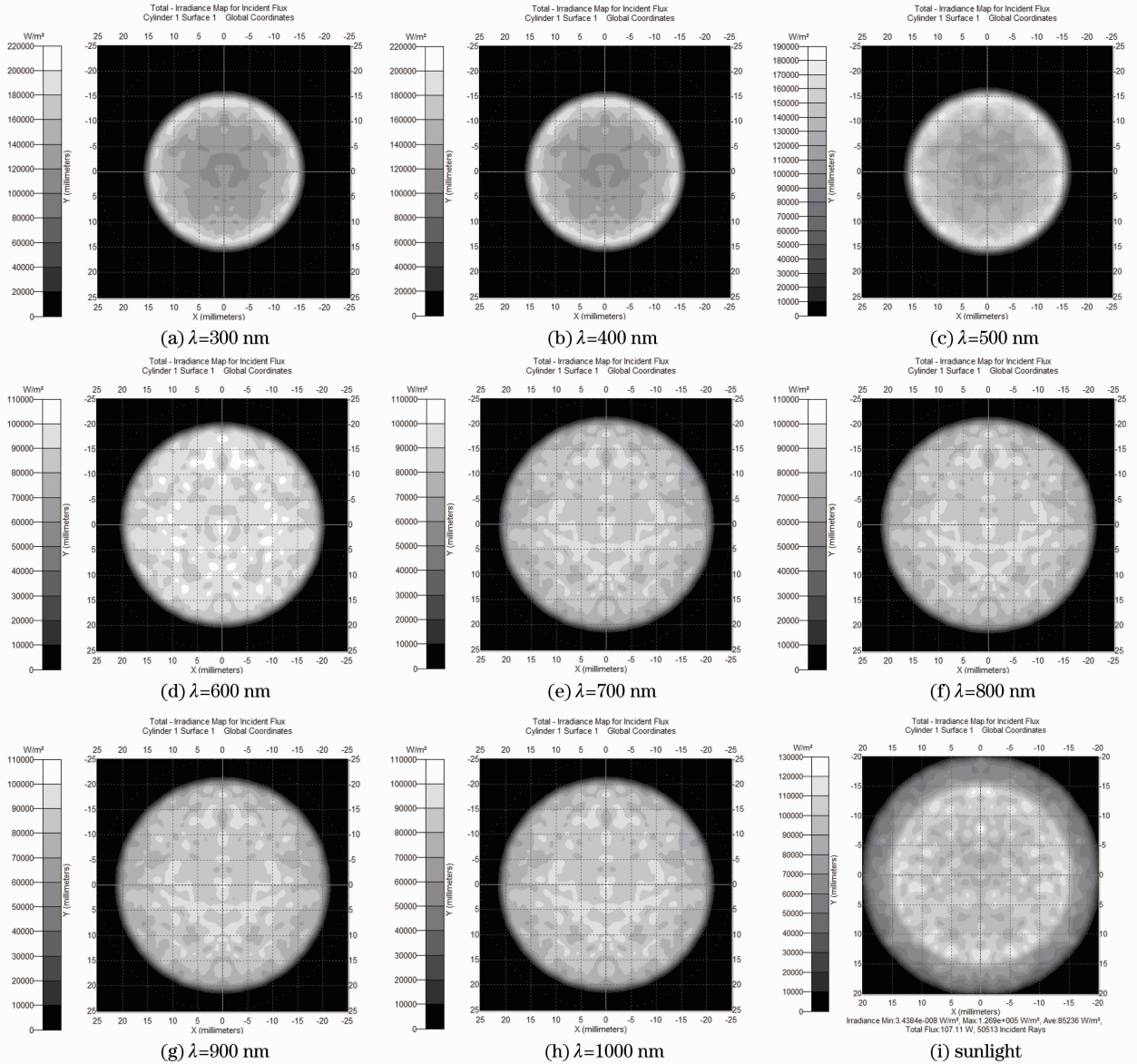


图 10 (a)~(h)不同单色波下的能量分布;(i)太阳光下的能量分布

Fig. 10 Images of energy distribution for (a)~(h) different single wavelengths and (i) the sum of all wavelengths weighted to solar spectrum at sea level

根据 IEC60904-9 国际标准的规定,光斑强度分布的均匀性可以表示为^[16]

$$\Delta E = 1 - \frac{E_{\max} - E_{\text{mean}}}{E_{\max} + E_{\text{mean}}} \times 100\% \quad (12)$$

式中 E_{\max} 代表光能接收面上光照强度的最大值, E_{mean} 代表光能接收面上光照强度的平均值。

图 10(a)~(h)表明:在单一波长的光照下,焦斑的能量分布均匀;随着光波长的增大,光斑面积增大; $\lambda=300 \text{ nm}$ 时光斑最小,光斑半径为 14.5 mm 。在图 10(i)中,计算得焦斑均匀度为 0.8 ,光学效率为

85.24%。且接收面 $-15\sim 15$ mm 中心区域光照度均匀性达到 0.9 以上,照度均匀性从 ± 15 mm 处向接收面边缘逐渐降低。

6 结 论

设计了一种环形焦斑菲涅耳太阳能聚光镜,与多焦点式聚光器类似,但实现方式不同,达到了焦点数目上的突破,显著提高了聚光均匀性。与共焦点菲涅耳透镜相比,该器件具有相同的加工工艺。最终得到了一种具有较高的光能利用率和聚光均匀性的菲涅耳太阳能聚光镜,对于促进太阳能采集发展具有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Du Chunxu, Wang Pu, Wu Yuting *et al.*. Concentration ratio analysis of linear Fresnel reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0808001
杜春旭,王 普,吴玉庭等. 线性菲涅耳聚光装置的聚光比分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0808001
- 2 Wang Gang, Chen Zeshao, Hu Fan *et al.*. Solar energy equal-illumination with a focus on Fresnel lens[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2012, **33**(1): 81~85
王 刚,陈则韶,胡 芃等. 太阳能等照度带聚焦菲涅耳透镜研究[J]. 太阳能学报, 2012, **33**(1): 81~85
- 3 Ye Shangping. The Study of a High Efficiency and Uniformity Solar Concentrator for III-V Solar Cells[D]. Taipei: Photoelectric Science and Engineering Research Institute, 2007
叶上平. 用于 III-V 族太阳能电池之高效率且均匀化聚光镜之研究[D]. 台北: 光电科学与工程学研究所, 2007
- 4 Zhang Sheng, Huang Dexiu, Yin Dongliang *et al.*. Design of a novel polarization beam splitting prism and its applications [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(1): 46~49
张 晟,黄德修,殷东亮等. 一种新型偏振分光棱镜的设计和应用[J]. 光电工程, 2003, **30**(1): 46~49
- 5 Yuan Xucang. Optical Design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. 212~230
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988. 212~230
- 6 Zhao Qingliang, Chen Junyun, Wu Xiaoguang *et al.*. Nonimaging design of a high efficient photovoltaic concentrator with $1000\times$ concentration[J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2011, **43**(5): 62~70
赵清亮,陈俊云,吴晓光等. 1000 倍聚光的光伏聚光器的非成像设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, **43**(5): 62~70
- 7 D. Vazquez-Molini, A. A. Fernandez-Balbuena, E. Bernabeu *et al.*. New concentrator multifocal Fresnel lens for improved uniformity: design and characterization[C]. *SPIE*, 2009, **7407**: 740701
- 8 Kwangsun Ryu, Jin-Geun Rhee, Kang-Min Park *et al.*. Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system[J]. *Solar Energy*, 2006, **80**(12): 1580~1587
- 9 Wu Heli. Study of Solar Concentrator[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010
吴贺利. 菲涅耳太阳能聚光器的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010
- 10 Li Xiangning. Lens design for Fresnel collimator with large aperture and linear fields[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(12): 53~58
李湘宁. 大口径线视场菲涅尔准直透镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(12): 53~58
- 11 Han Yanmin. The Oretical and Experimental Study on Transmission and Utilization of High Concentrated Solar Energy [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008
韩延民. 太阳能高倍聚光能量传输利用理论及实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008
- 12 Zhang Ming, Huang Liangfu, Luo Chongtai *et al.*. Study on design and optical efficiency of flat type Fresnel lens for space application[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(5): 18~21
张 明,黄良甫,罗崇泰等. 空间用平板型菲涅耳透镜的设计和光学效率研究[J]. 光电工程, 2001, **28**(5): 18~21
- 13 Arthur Davis. Fresnel lens solar concentrator derivations and simulations[C]. *SPIE*, 2011, **8129**: 81290J
- 14 Guo Xiaowu. Uniform design method of Fresnel lens[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1991, **12**(4): 423~426
郭孝武. 菲涅耳透镜统一设计方法[J]. 太阳能学报, 1991, **12**(4): 423~426
- 15 Jian-Shian Lin, Wei-Chih Huang, Hsiu-Chen Hsu *et al.*. A study for the special Fresnel lens for high efficiency solar concentrators[C]. *SPIE*, 2005, **5942**: 59420X
- 16 Ru Zhanqiang. Design and Performance Analysis of Secondary Optics in Concentrated Photovoltaic Module [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010
茹占强. 应用于聚光光伏模组的二次聚光器的设计与性能分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2010