

# 全内反射型太阳能聚光模块设计与研究

王 骁, 曹 秒, 安志勇, 曹维国

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘 要:** 设计了用于太阳能聚集的全内反射(Total-internal-reflection, TIR) 聚光器并采取措施进行优化, 将多个 TIR 聚光器进行叠加放置在光波导板组成波导聚光模块。太阳光线经 TIR 聚光器阵列收集后照射到光波导板上并在其内部传播, 由末端的光伏电池吸收。由实验结果可知, 在光波导板长度为 400 mm 增至 4 800 mm 的过程中, 光学效率由 88.6% 降低为 40.2%, 而辐照度由 212 W/m<sup>2</sup> 增长为 980 W/m<sup>2</sup>。这样根据不同需求选取不同长度的光波导板, 并在保证较高的输出功率的前提下大大减少所需使用的光伏电池面积, 同时 TIR 聚光器只需水平放置在光波导板上, 避免了透镜阵列与光波导板的严格对准要求, 降低了制造与装配成本。

**关键词:** TIR 聚光器; 光波导板; 太阳能; 光学效率; 辐照度

**中图分类号:** TK513.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1020001

## Design and research of total-internal-reflection solar energy concentrating module

Wang Xiao, Cao Miao, An Zhiyong, Cao Weiguo

(Photo-electrical Engineering Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Total-internal-reflection(TIR) concentrator for solar concentration was designed, and a series of measures was adopted to optimize. Then lots of TIR concentrators was superimposed and assembled on the waveguide slab to form the waveguide concentrating module. Collected by the TIR concentrator array, the sun light incident on the waveguide slab continued to propagate in it, and was absorbed by the photovoltaic cells in the end. The experimental result shows that when the length of the waveguide slab increased from 400 mm to 4 800 mm, the optical efficiency decreased from 88.6% to 40.2%, while the irradiance concentration grew from 212 W/m<sup>2</sup> to 980 W/m<sup>2</sup>. Thus different lengths of the waveguide slab can be selected according to different requirements. While getting the high output power, the area of photovoltaic cells used is decimated. At the same time, the TIR concentrator can be just placed on the waveguide slab, avoiding the demand of aligning strictly the lens array and the waveguide slab, which is convenient in installation and adjustment.

**Key words:** TIR concentrator; waveguide slab; solar energy; optical efficiency; irradiance concentration

收稿日期: 2016-02-13; 修订日期: 2016-03-15

基金项目: 吉林省重大科技招标专项(20150203019G X)

作者简介: 王骁(1991-), 男, 硕士生, 主要从事精密测控技术与仪器方面的研究。Email: custalex@163.com

导师简介: 安志勇(1943-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测方面的研究。Email: an\_zhiyong@126.com

## 0 引言

作为一种可再生的绿色清洁能源,太阳能具有辐射量大、覆盖面广、蕴含量高的特点,已经普遍应用于人们的日常生活中<sup>[1-3]</sup>,其中太阳能光伏发电能够有效缓解能源危机和减少环境污染,具有广阔的应用前景,已成为近年来能源领域的研究重点<sup>[4]</sup>。

目前大多数光伏发电系统设计<sup>[5-7]</sup>采用单轴或双轴结构带动光伏电池板实现对太阳轨迹的动态追踪,一般是通过优化追踪策略来提高追踪精度,普遍使用面积较大、价格昂贵的光伏电池板,提高了系统的设计与安装成本。对此,很多学者从光学聚光器方面入手,提出了多种设计思路。光学聚光器可以分为传统型和平板型两种,传统型聚光器一般有槽式、碟式、菲涅耳透镜式<sup>[8-11]</sup>等,通过设计的光学系统将光线直接聚集到光伏电池上,能够提供较高的聚光比,但是加工复杂,需要较大的空间,且聚光均匀性较差,容易造成光电池被弱光照射的地方成为负载,导致电能内耗并引起温升等严重问题;平面型聚光器是太阳光线通过聚光器收集后,借助平面光波导板进行传递,能够提供从高到低的聚光比,体积小紧凑。Karp<sup>[12]</sup>等提出了一种新颖的太阳能聚光方式,太阳光经二维透镜阵列的每一个球面镜收集后进入共有的平面光波导板,通过蒙特卡罗(Monte Carlo)光线追迹方法对设计的聚光器进行仿真和优化;Hallas<sup>[13]</sup>等在此基础上设计了二维追踪平台,通过微型步进电机带动三个凸轮来调整光波导板的位置以实现光波导板与透镜阵列的对准,实际测试表明在天气晴朗光线充足的中午,聚光器的光学效率接近理论值;Bouchard<sup>[14]</sup>等用柱面镜代替球面镜,并将柱面镜阵列放置于东西方位的单轴季节追踪器上,由于柱面镜起到聚焦的作用,这样节省了在俯仰方向上的跟踪,虽然聚光效率大大下降,但制造和安装费用下降,具有相当高的性价比。

这些设计虽然在理论上能够获得较高的聚光比,且所需使用的光伏电池面积大大减少,但是需要采取措施保证光波导板严格对齐在透镜阵列的焦平面上,这一要求增加了制造费用,而且装配较为困难,不利于市场推广。另外,20世纪80年代发展起来的 TIR 型聚光器具有结构紧凑、色散小、聚光效率

较高等优点,但也存在光照均匀度较差的问题,制约了其在聚光光伏系统中的应用。西班牙 Isofoton 公司开发的全内反射-折射(Total Internal Reflection-Refraction, TIR-R)聚光器综合利用了折射、反射、全反射等聚光方式,能够有效提高聚光效率,但是结构较为复杂,制造难度相对较大;Sukki<sup>[15]</sup>等设计了一种新兴的镜像对称式介质全内反射聚光器(Mirror Symmetrical Dielectric Totally Internally Reflecting Concentrator, MSDTIRC),可以将其应用于光伏建筑一体化(building integrated photovoltaic, BIPV)系统中,具有良好的发展前景;而国内在这方面的研究相对较少,包括在 TIR-R 聚光器的基础上加入匀光器改善光照均匀性、采用 SMS (Simultaneous Multiple Surface) 方法设计一种包含具有全反射和折射功能的主透镜与具有折射功能的二次透镜的 1 000 倍聚光器等,虽然能够实现高倍聚光,但设计比较复杂,实用性不强。文中通过设计 TIR 聚光器并结合光波导板组成波导聚光模块,聚光器阵列只需水平放置在光波导板上,大大降低制造与装配的难度。

## 1 太阳能聚光器的设计

### 1.1 TIR 聚光器的设计及优化

聚光光伏系统一般通过聚光器聚集太阳光线,减少发电需要使用的电池板面积,降低制造成本。目前聚光器广泛使用菲涅耳透镜,其具有质量轻、用材少、设计较为简单的优点,但由于光能损失会导致聚光比降低;而 TIR 结构能够减少光能损失,并且结构紧凑,具有较高的聚光效率,因而这里选用 TIR 聚光器。为简化起见, TIR 聚光器采用抛物面作为全内反射面,入射的太阳光线在聚光器内部经全反射会聚于焦点上。由于被收集的太阳光线需要进入下面的光波导板,所以需要移除焦平面以下的部分以保证光线能够通过。以抛物面的焦点为原点建立如图 1 所示的  $x-y-z$  坐标系,将抛物面投影到  $x-z$  坐标系可得到如图 2 所示的抛物线,其表达式为:

$$z=ax^2, x \leq -x_i, x \geq x_i; x_i = \frac{1}{2a} \quad (1)$$

式中: $a$ 为任意系数。

从图 2 中可以看出,未经抛物面反射而直接通过开口照射到光波导板上的光线会直接透过波导板而散失,导致光学效率下降;此外,进入光波导板的光

线分成两束传播,而光伏电池放置在波导板的一端,导致向另一端传播的光束无法被吸收,光学效率减半。除采取切半措施外,还采取了进一步的优化措施,得到的效果图如图 3 所示,它是由前、后两个相同的抛物面组成,两面之间的距离固定,并按照图 4 所示前后叠加多个这样的改进型 TIR 聚光器。

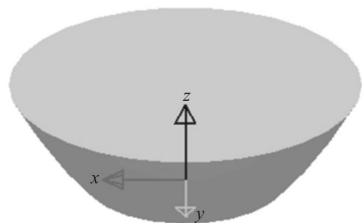


图 1 移去底端的抛物面三维视图

Fig.1 Three-dimensional view of the paraboloid removing the bottom

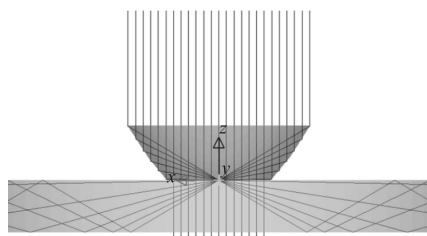


图 2 抛物面在 x-z 坐标系的投影图

Fig.2 Projection map of the parabolic in x-z coordinate system

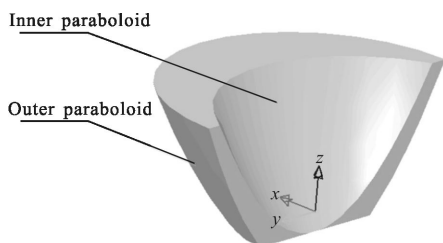


图 3 优化后的 TIR 聚光器三维视图

Fig.3 Three-dimensional view of the optimized TIR concentrator

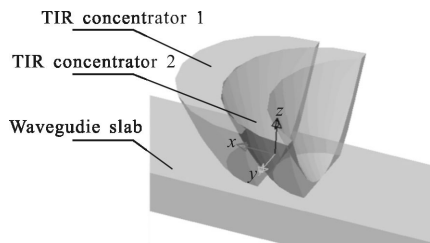


图 4 叠加后的两个聚光器的三维视图

Fig.4 Three-dimensional view of two concentrators after superposition

但是在模拟光路过程中,发现入射到 TIR 聚光器两侧的边缘光线虽然也能进入光波导板内部,但仍会从光波导板的侧面射出,因而切除 TIR 聚光器的两侧部分,得到的效果示意图如图 5 所示。图 6 所示为前后叠加多个这样的改进型 TIR 聚光器,从图中可以看出,由抛物面反射的光线均向光波导板的一端传播,通过叠加的方式使前一个 TIR 聚光器的底面被后一个 TIR 聚光器外抛物面所遮挡,并切除聚光器的两侧部分,减少了开口和两侧导致的漏光现象,极大地提高了聚光效率。

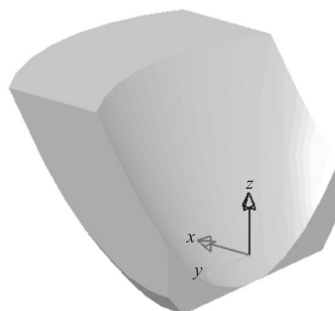


图 5 切除外边沿的改进型 TIR 聚光器三维图

Fig.5 Three-dimensional view of the improved TIR concentrator removing the outer edge

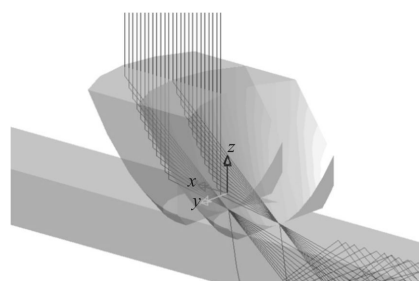


图 6 叠加后的两个改进型聚光器三维视图

Fig.6 Three-dimensional view of two improved concentrators after superposition

为保证进入光波导板的光线在其内部能够通过全反射持续传播,入射到光波导板上的光线的入射角应该大于临界角。由切线斜率公式  $\frac{dz}{dx}=2ax$  可知,抛物线上任意一点离顶点越远,其切线斜率越大,它所反射的太阳光线入射到光波导板的角就越小,所以需要限制 TIR 聚光器的高度。假设光波导板的折射率为  $n$ ,TIR 聚光器外抛物面在最大高度点的切线斜率可用该点切面与  $x-z$  面的夹角  $\theta$  表示为:

$$(\tan\theta)_{\max} = \frac{\sqrt{n + \sqrt{n^2 - 1}}}{n - \sqrt{n^2 - 1}} \quad (2)$$

考虑到焦点坐标为  $(0, \frac{1}{4a})$ ，而焦点所在平面以下部分被移除，TIR 聚光器的最大高度应限制为：

$$h_{\max} = \frac{(\tan\theta)_{\max}}{2a} - \frac{1}{4a} \quad (3)$$

### 1.2 波导聚光模块的设计

光波导板的主要作用是帮助入射到其内的光线通过全反射持续传播，同时提供较好的匀光效果，使光线能够均匀照射到末端的光伏电池上。将多个改进型 TIR 聚光器叠加成聚光阵列，严格水平放置于光波导板表面，合称为波导聚光模块。光波导板一侧放置光伏电池来吸收传递过来的太阳光线，其结构示意图如图 7 所示。

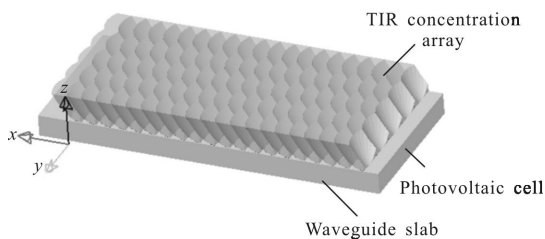


图 7 波导聚光模块结构示意图

Fig.7 Structure schematic diagram of the waveguide concentrating module

定义几何聚光比为光学系统的输入面积与输出面积之比，对于平面波导聚光器来说是指光波导板的长度与厚度之比，由公式(4)可表示为：

$$C_{\text{geo}} = \frac{l_w}{h_w} \quad (4)$$

式中： $l_w$  为光波导板的长度； $h_w$  为光波导板的厚度。

而光学聚光比则定义为几何聚光比  $C_{\text{geo}}$  与光学效率  $\eta$  的乘积：

$$C_{\text{flux}} = \eta \times C_{\text{geo}} \quad (5)$$

如无特别说明，聚光比特指几何聚光比。

当光线在波导聚光模块内部传播时会有部分光线被其材料吸收，转换为热量导致光波导板的使用寿命下降，因而根据光线频谱范围选择合适的光学材料具有重要的意义。这里以常用的光学材料 PMMA (Polymethyl Methacrylate) 和 BK7 为例，PMMA 在可见光范围内吸收较少，具有较高的光学效率，但

由于对红外光具有较强的吸收作用，PMMA 在红外光谱范围 (770~1100 nm) 内的光学效率急剧下降；而 BK7 在这两个频谱范围内对光线的吸收较多，并没有太大的差别。在实际应用中，由于红外光更易被吸收转换为热能，一般需要采取相关措施对红外光进行屏蔽，这样入射到波导聚光模块上的光线基本为可见光，因而选取 PMMA 作为制作材料，不但能够提供较高的光学效率，而且在体积相同的情况下质量更轻，便于运输与装配。

另外，聚光阵列与光波导板接触位置即光线的理论焦点位置，由于光线进入波导板后呈现一定角度发散，但光线入射角始终大于临界角产生全反射现象，所以聚光阵列与光波导板不需要严格对准。由于所需使用的光伏电池板面积大大减少，并置于光波导板一侧，可以在其背面方便安装合适的散热片，而且由于红外光被屏蔽，由 TIR 聚光阵列收集的光线被吸收的部分产生的热量大大减少，通过光波导板均匀照射到光伏电池上，这样光伏电池的工作温度不会太高，仍能保持较高的光电转换效率。

## 2 实验分析

使用 LightTools 光学软件进行仿真实验，其中所使用的光波导聚光模块材料为 PMMA，折射率为  $n=1.490$ ；模拟光源采用可见光，波段为 400~700 nm；TIR 聚光器的高度  $h=15\text{ mm}$ ，宽度  $w=15\text{ mm}$ ，两抛物面在  $x$  轴相隔的距离  $d=10\text{ mm}$ ；光波导板厚度为 3 mm，宽度为 250 mm，长度为 4800 mm，并在其上面水平放置  $1.5 \times 10^4$  个聚光器。考虑到半波损失和太阳张角，最终的仿真结果如图 8 和图 9 所示。

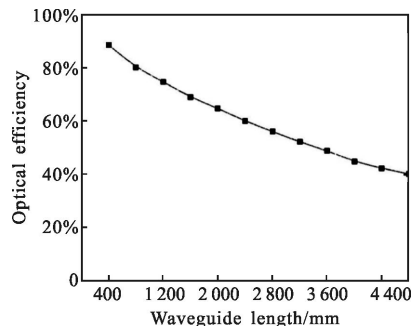


图 8 光学效率随光波导板长度变化图

Fig.8 Optical efficiency changing with the length of the waveguide slab

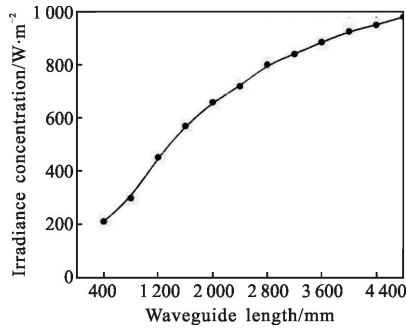


图 9 辐照度随光波导板长度变化图

Fig.9 Irradiance concentration changing with the length of the waveguide slab

从图中可以看出,随着光波导板长度的增加,系统的 $\eta$ 逐渐下降,而辐照度逐渐上升。这一原因 $\eta$ 在于光波导板长度增加之后,其上附加的 TIR 聚光器数目增多,这样可以收集更多的太阳光线,辐照度增加;但在这一过程中会有更多的太阳光线在聚光阵列入射面反射而损失,而进入光波导板内部的光线由于光波导板长度增加,传播距离也随之增大,将会有更多的光线从光波导板射出或被光学材料吸收,导致最终的 $\eta$ 下降。在光波导板长度为 400 mm ( $C_{geo}=133\times$ ) 时, $\eta$ 达到了 88.6%,辐照度只有 212 W/m<sup>2</sup>;随着光波导板长度达到最大值 4 800 mm ( $C_{geo}=1\ 600\times$ ),由于光学材料吸收而损失的光能 $\eta$ 从 1.8%增至 7.6%,从聚光阵列与光波导板接合处和光波导板侧面漏出的光能损失从 4.2%增至 28.8%,而由于聚光阵列反射而损失的光能 $\eta$ 从 5.1%增加至 26.8%,此时 $\eta$ 只有 40.2%,而辐照度则达到 980 W/m<sup>2</sup>。

这样可以根据不同场合的需要选取不同长度的光波导板,比如在光伏发电系统一般采用较短的光波导板减小系统体积,并获得较高的 $\eta$ ;而在光热系统使用更长的光波导板以便收集更多的太阳光能来提高辐照度,实现快速、高效的光热转换。

上面的仿真分析是在太阳光以 0°入射聚光阵列的情况下进行的,而在实际设计中,要求追踪装置跟踪太阳没有指向误差是不现实的,因而需要考虑入射角改变后波导聚光模块的接收效果。在考虑光学材料对光线的吸收和太阳张角的前提下,将模拟光源发出的光线设置为具有不同入射角的平行光束,光波导板长度设置为 400 mm,对波导聚光模块进行

大量光线的仿真分析。从图 10 的 $\eta$ 结果可以看出,当入射角增大到 0.5°时, $\eta$ 为 85.4%;当入射角增大到 1.0°时, $\eta$ 逐渐下降为 67.6%;但当入射角增大为 1.5°时, $\eta$ 下降到低于原来的 15%,因此,波导聚光模块的最大可允许追踪误差为 $\pm 1.5^\circ$ ,在实际中为保证较高的 $\eta$ ,一般设置波导聚光模块的设计跟踪误差为 $\pm 0.5^\circ$ ,可采用高精度双轴跟踪策略来保证追踪太阳的精确度。

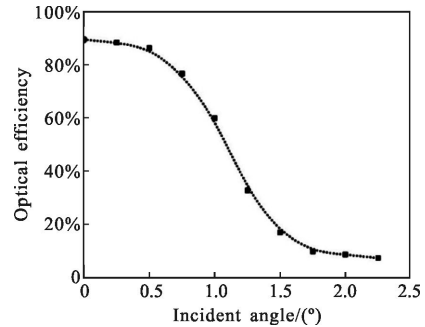


图 10 波导聚光模块光学效率与光线入射角的关系

Fig.10 Relationship between the optical efficiency of the waveguide concentrating module and the incident angle

### 3 结 论

文中采用抛物面作为全内反射面,设计了 TIR 聚光器并采取相应措施进行了优化,通过叠加成聚光阵列的形式水平放置在光波导板表面上构成波导聚光模块,避免了透镜阵列与光波导板的严格要求,最大限度保证了所有进入光波导板的入射光线均能均匀照射到一侧的光伏电池上。在采取措施屏蔽红外光的前提下,波导聚光模块采用 PMMA 制作,不但能够提供较高的 $\eta$ ,而且同体积下与其他光学材料相比具有更轻的质量,便于运输与装配。仿真结果表明,在光波导板长度为 400 mm 时, $\eta$ 为 88.6%,辐照度为 212 W/m<sup>2</sup>;光波导板长度为 4 800 mm 时, $\eta$ 下降为 40.2%,辐照度达到 980 W/m<sup>2</sup>,由此可知系统的 $\eta$ 与光波导板的长度成反比,而辐射度与之成正比。这样可以根据不同需求选择不同长度的光波导板,具有较广泛的市场前景。

### 参 考 文 献:

[1] Xue Jiyuan, Feng Wenlin, Zhao Fen, et al. Output characteristic and application for solar panel[J]. *Infrared and*

- Laser Engineering*, 2015, 44(1): 176–181. (in Chinese)  
薛继元, 冯文林, 赵芬, 等. 太阳能电池板的输出特性与实际应用研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 176–181.
- [2] Yang Xiaoguang, Wang Youhua, Ding Ning, et al. Development of a system of solar LED street lamp lighting [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, 25(6): 130–136. (in Chinese)  
杨晓光, 汪友华, 丁宁, 等. 太阳能 LED 路灯照明系统的研制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 130–136.
- [3] Whang A J W, Chen Y Y, Yang S H, et al. Natural light illumination system[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(35): 6789–6801.
- [4] Wang Yiping, Li Wenbo, Zhu Li, et al. Research progress of concentrator photovoltaic cells and systems[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2011, 32(3): 433–438. (in Chinese)  
王一平, 李文波, 朱丽, 等. 聚光光伏电池及系统的研究现状[J]. 太阳能学报, 2011, 32(3): 433–438.
- [5] Zhang Haiyan, Wang Jianping, Zhang Chongwei. Design of multi-mirror reflective concentrator for single-axis rotating tracker [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2011, 32(12): 1764–1771. (in Chinese)  
张海燕, 王建平, 张崇巍. 单轴旋转跟日式多平面镜反射聚光器的设计[J]. 太阳能学报, 2011, 32(12): 1764–1771.
- [6] Bian Xingao, Yang Fengfeng, Xin Qiuxia. An automatic sun-tracking method in large range [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2010, 31(10): 1298–1303. (in Chinese)  
卞新高, 杨缝缝, 辛秋霞. 一种大范围太阳光线自动跟踪方法[J]. 太阳能学报, 2010, 31(10): 1298–1303.
- [7] Zhang Lei, Zheng Xigui. Development of automatic tracking device of high precision solar energy [J]. *Manufacturing Automation*, 2014, 36(5): 129–132. (in Chinese)  
张磊, 郑喜贵. 高精度太阳能自动跟踪装置的研制 [J]. 制造业自动化, 2014, 36(5): 129–132.
- [8] Qu Hang, Zhao Jun, Yu Xiao. Simulation of parabolic trough solar power generating system for typical Chinese sites [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(11): 87–93. (in Chinese)  
曲航, 赵军, 于晓. 抛物槽式太阳能热发电系统的模拟分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(11): 87–93.
- [9] Wang Yunfeng, Ji Jie, He Wei, et al. Performance analysis and design of paraboloidal dish solar concentrators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 198–205. (in Chinese)  
王云峰, 季杰, 何伟, 等. 抛物碟式太阳能聚光器的聚光特性分析与设计[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 198–205.
- [10] Zhang Mingjun, Gao Wenying, Niu Quanyun, et al. Characteristics analysis and simulation of Fresnel concentrator in concentrated photovoltaic system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2411–2416. (in Chinese)  
张明军, 高文英, 牛泉云, 等. 聚光光伏系统菲涅耳聚光器性能分析与仿真[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2411–2416.
- [11] Ning Duo, Liu Feihang, Wu Yanrui, et al. Non-tracking transmission solar concentrators [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(11): 2284–2287. (in Chinese)  
宁铎, 刘飞航, 吴彦锐, 等. 免跟踪透射式太阳聚光器的设计[J]. 光子学报, 2008, 37(11): 2284–2287.
- [12] Karp J H, Tremblay E J, Ford J E. Planar micro-optic solar concentrator[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1122–1133.
- [13] Hallas J M, Baker K A, Karp J H, et al. Two-axis solar tracking accomplished through small lateral translations [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6117–6124.
- [14] Bouchard S, Thibault S. Planar waveguide concentrator used with a seasonal tracker [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(28): 6848–6854.
- [15] Muhammad-Sukki F, Abu-Bakar S H, Ramirez-Iniguez R, et al. Mirror symmetrical dielectric totally internally reflecting concentrator for building integrated photovoltaic systems [J]. *Applied Energy*, 2014, 113(6): 32–40.