

# 聚光光伏系统的发展及未来趋势

刘 华<sup>1</sup>, 卢振武<sup>1</sup>, 朱 瑞<sup>1,2</sup>, 张洪鑫<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要** 介绍了聚光光伏系统的发展历史和研究现状。对聚光光伏系统中的主件—聚光器和光伏电池进行了详细分类,给出了它们的特点和主要参数。描述了国外一些厂家为提高光伏系统效率并降低成本而研制的太阳跟踪系统。总结出聚光光伏系统的发展趋势,主要是指高倍聚光器+跟踪系统和低倍大角度聚光器+分光元件+多节电池等。最后就目前状况提出了聚光光伏系统商业化还需要解决的问题。

**关键词** 聚光光伏系统;聚光器;光伏电池;综述

中图分类号:TK513 文献标识码:A

## Development and tendency of photovoltaic concentrator system

LIU Hua<sup>1</sup>, LU Zhen-wu<sup>1</sup>, ZHU Rui<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong-xin<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract**: The development history and research situation of Photovoltaic (PV) concentrator system are briefly reported in this paper. The concentrators and solar cells for PV system are classified in detail, then their characteristics and technological parameters are introduced. Several solar tracking systems developed by foreign countries are described, which can improve the conversion efficiency and can reduce produce cost for PV system. Moreover, two kinds of applied tendencies about PV concentrator system are discussed, they are high magnification concentrator + tracking system and low magnification and large angle concentrator + beam splitter + multisection batteries. Finally, main problems on the commercialization of PV concentrator system are presented.

**Key words**: photovoltaic concentrator system; concentrator; PV cell; review

## 1 引言

太阳能以其储量的“无限性”、存在的普遍

性、开发利用的清洁性等优势,已经成为解决能源短缺、环境污染和温室效应等问题的有效途径。对太阳能的利用形式通常有光-热转换、光-电转换、光-化学和光-生物转换,其中最安全、最灵活

的利用形式是光-电转换,即利用光伏电池将太阳能转换成电能。

目前由于平板式光伏电池光电转换效率较低且材料价格昂贵,致使太阳能发电成本很难与传统的煤炭发电相竞争。而使用聚光光学元件形成聚光光伏电池,则能极大提高光电转换效率、减小电池使用面积,同时由于小尺寸电池可以利用现有集成电路制作工艺来进行加工,从而使太阳能光伏发电总体成本大幅度降低。未来的发电模式应该是“价廉物美的聚光光学元件+高转化效率光伏电池”。

## 2 聚光光伏系统的发展历史

正是由于聚光光伏系统有着很多诱人的优势,早在1976年,美国Sandia实验室便首次成功建成了—个功率为1 kWp( Watt-Peak, Wp, 峰瓦值,描述电池板功率的单位)、转换效率为12.7%的聚光光伏系统。其聚光器为点聚焦的菲涅尔透镜,聚光比为50,光伏电池为硅电池,跟踪系统为双轴跟踪。至此到80年代末,美国、西班牙、法国、意大利等国家的研究机构均纷纷展开相关研究,但是由于处于发展初期,所形成的聚光光伏系统基本为实验室示范工程,其转换效率一般在10%左右,由于成本过高,并没有得到商业化应用。不过人们对聚光光伏发电技术的研究却在很多方面取得了突破<sup>[6-9,11]</sup>:

1)在聚光器方面,Entech公司开发出性能极好的线聚焦弓形菲涅尔透镜。Varian and OSG开发出具有弯曲表面的菲涅尔透镜,能消除阴影效应的影响。

2)在光伏电池方面,高效率的硅电池得到迅速发展。1986年,实验室聚光硅电池转换效率高达28%,同时研制出多节电池。所谓多节电池,就是用不同带隙的半导体材料层层堆积而制成的电池,在多节光伏电池的上层用高带隙材料,以吸收太阳光谱中高频光子的能量,而下层的低带隙半导体则把低能量光子转换成电能,从而满足吸收太阳光不同波段光谱的需要。当前常用的半导体材料为III-V族半导体化合物如GaAs、GaSb、GaInP等。

3)光谱分离技术、棱镜盖板技术开始出现。光谱分离技术就是将太阳光按照光谱分成几部分,每一部分直接进入禁带宽度不同的电池,充分利用入射能量。棱镜盖板技术可以将入射光线折射到金属条之间的电池有效区域,以便更好地利用入射光。

4)静态低倍聚光系统不断形成。低倍聚光系统虽然聚光倍数不高,但有很多优点,比如不需要跟踪系统,系统冬季输出较高等,这些都提高了它的经济效率。当然这种聚光系统不适用于大型光伏电站,而只适用于屋顶或便携式光伏发电。

进入90年代后,聚光光伏发电系统开始慢慢被商业应用,并形成了一些有影响力的公司,如Entech、Amonix、Concentrix Solar GmbH等。美国Amonix公司研发的集成高效率聚光硅光伏电池发电系统(IHCPV),已经应用到很多场所。该系统的核心技术是 $10\text{ mm}^2$ 点接触绒面硅光伏电池的光电转换效率高达25%~27%;所使用的聚光式菲涅耳透镜由普通丙烯酸塑料模压制而成,制造简单,价格便宜。因此,集成高聚光光伏技术是现有实用的各种光伏技术中发电成本最低的一种。德国Concentrix Solar GmbH公司于2008年进行聚光光伏系统模型试验,其聚光系统采用的是FLATCON聚光模块,实质上就是由玻璃注塑成型的菲涅耳透镜,聚光比为500,电池集成封装基底上的精度为 $25\text{ }\mu\text{m}$ ,采用了电路板工艺和绝缘玻璃技术,使成本效益相对合算并且多年内系统仍可保持性能稳定可靠,示范模型的效率高于27%。

## 3 聚光光伏系统中聚光器的类型

经过几十年的发展,为了尽量提高效率和节省材料,聚光光伏系统经历了一次次的革新,其中聚光器件也不断地发生相应的变化,这里按其类型介绍如下:

### 1)传统折射式的光能收集器

折射式的光能收集器可以是传统的连续透镜,也可以是菲涅尔型透镜,而菲涅尔型透镜更具优势<sup>[25]</sup>:

(1)菲涅尔透镜当口径很大时可以制作得薄

并且轻。

(2)用菲涅尔透镜作聚光器比采用镜片可以有更大的口径,也就是菲涅尔透镜可以具有很低的 $f$ 数。

(3)制作菲涅尔透镜的材料可以是塑料或者是有机玻璃,不仅比玻璃便宜轻便,而且可以批量生产。菲涅尔透镜有点聚焦(见图 1)和线聚焦(见图 2)两种,跟踪系统类型可以相应为二维跟踪和一维跟踪。根据不同的应用场合可选取不同的聚焦方式。

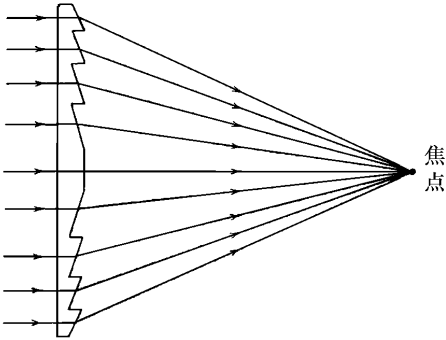


图 1 点聚焦菲涅尔透镜

Fig. 1 Point focus Fresnel lens

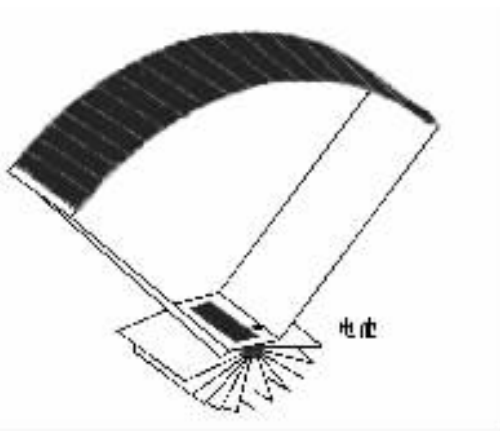


图 2 线聚焦菲涅尔透镜

Fig. 2 Line focus Fresnel lens

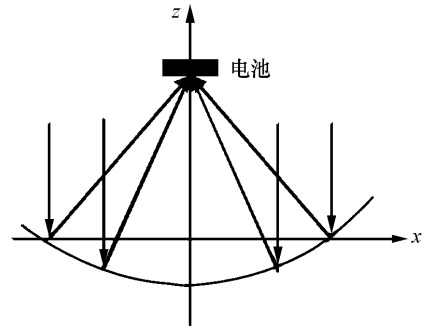


图 3 曲面反射镜式聚光镜

Fig. 3 Parabolic mirror concentrator

斗”,它要求大面积上的入射光被折射或反射后能通过一块小得多的面积来达到聚能的目的。因此,非成像光学应用于太阳能聚光器不仅可以得到很高的聚光比,还能获得较大的接收角以及较小的体积。这非常适合作为非跟踪式的静态聚光器,并进行集成<sup>[2,27]</sup>。美国特拉华大学最新研制的超高效硅太阳能电池,在标准的陆地日光条件下,其太阳能转换效率达到创纪录的 42.8%,比其他种类太阳能电池高出大约 30%,是目前最好的硅太阳能电池的 2 倍,其采用的聚光器便为非成像式的光学系统。非成像聚光器有以下几种:

#### (1)复合曲面线式非成像聚光器

这是一种三维光学系统,四壁为复合曲面式的反射镜,底部为 PV 电池板,复合曲面可以为复合抛物面(CPC,见图 4(a)),复合双曲面(CHC,见图 4(b)),复合椭球面(CEC,见图 4(c))。但是这类聚光器轴向长度一般比较长,体积大<sup>[4,5,12,18]</sup>。

#### (2)理想管状聚光器

这种聚光器的 PV 电池板一般需要竖直放置,且两面均可吸收光能。

#### (3)折射式聚光镜(RR)

这种类型的透镜(见图 5)外形类似于传统的透镜,光线经过两次折射后到达 PV 电池,该聚光镜的优点是接收角度可以很大(半角可 $>15^\circ$ ),但实际聚光比相比于理论聚光比差距较大,只有理论聚光极值的 30% 左右,导致这种情况的原因是由于聚光镜横纵比较小,即中心厚度过大,因此材料的散射、吸收对最终结果影响加大<sup>[10]</sup>。

## 2)传统反射镜式光能收集器

反射镜式光能收集器(见图 3)主要是利用反射镜将入射太阳光聚焦到 PV 电池板上。

## 3)非成像太阳能聚光器

非成像聚光器设计的最终要求是在单位面积上获得最大强度的光,其实质是一个光学“漏

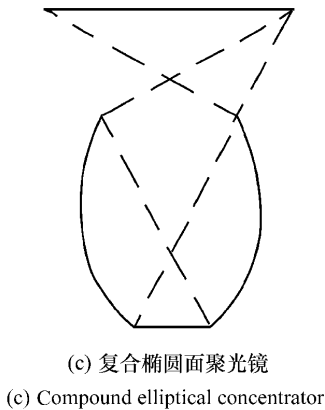
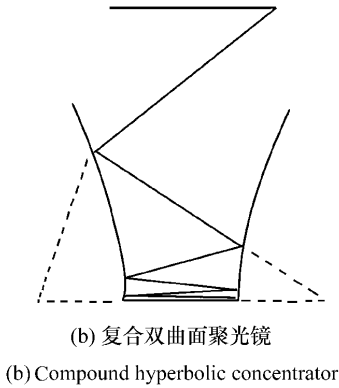
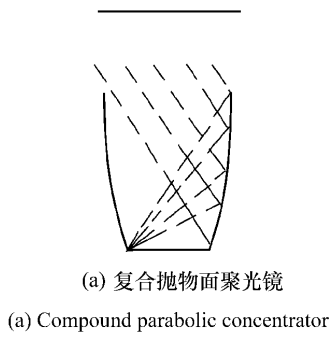


图 4 复合曲面聚光器

Fig4. Compound profile concentrators

(4) 反射折射式聚光镜 (XR)

在 XR 型聚光镜(见图 6)中,光线先经过反射再经过折射汇聚到光伏电池上,相比于 RR 型透镜,相同接收角度时, XR 型的聚光比大大提高,透过率却相对较低,原因是接收电池的背部朝向光源,由于遮挡而增加了阴影面积,减小了透过率。另外,由于镜面和电池是两个相对独立的元件,封装固定较为困难<sup>[23, 25]</sup>。

(5) 折反射式聚光镜 (RX)

鉴于 XR 型透镜难于集成封装的缺点,逐渐

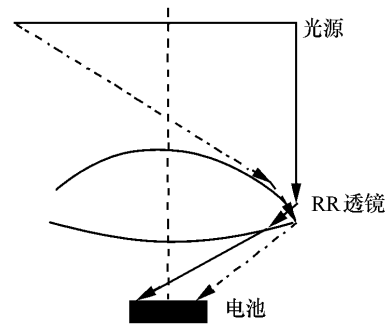


图 5 RR 式聚光镜

Fig. 5 Refraction-Refraction concentrator

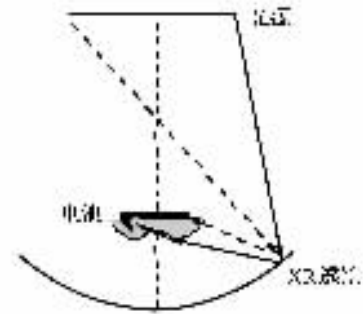


图 6 XR 式聚光镜

Fig. 6 Reflection-Refraction concentrator

演变出了 RX 型聚光镜(见图 7),RX 聚光镜可以铸造成一个整体元件,电池有效表面虽然仍背向光源,但聚光效果明显优于 XR 型聚光镜,并且体积可以做得较大。在不考虑材料成本而考虑集成难度时, RX 型聚光镜是一个较好的选择<sup>[21]</sup>。

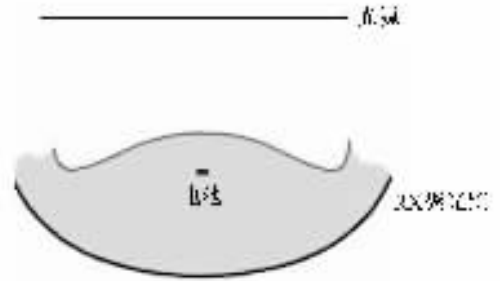


图 7 RX 式聚光镜

Fig. 7 Refraction-Reflection concentrator

(6) 全反射式聚光镜 (RXI)

区别于前几种聚光镜, RXI 聚光镜(见图 8)的电池有效接收面朝向光源,使电池的底部封装

变得简易,而且由于引入了上表面的一次全反射,使能量损失减小,透过率提高,能以较小的体积获得较高的

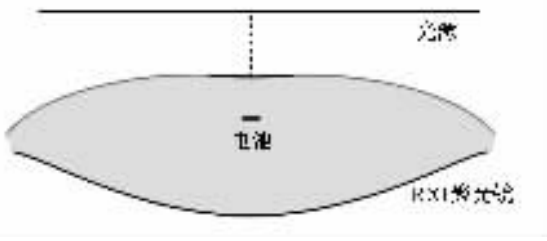


图 8 RXI 式聚光镜

Fig. 8 Refraction-Reflection-Total Internal Reflection concentrator

聚光比,适合集成。通过注塑成型,可以大大降低成本,发展前景很大<sup>[20-26]</sup>。

#### (7) 二次结构内部全反射式聚光镜(TIR-R)

TIR-R 聚光镜(见图 9)主聚光镜为锯齿形,次镜为折射镜,聚光镜内部有些不能一次到达次镜的光线会因发生全反射而改变光路,因此可以进一步成为有效光线而减小能量损失,避免了其他类型聚光镜存在的散射等损失<sup>[13-29-30]</sup>。

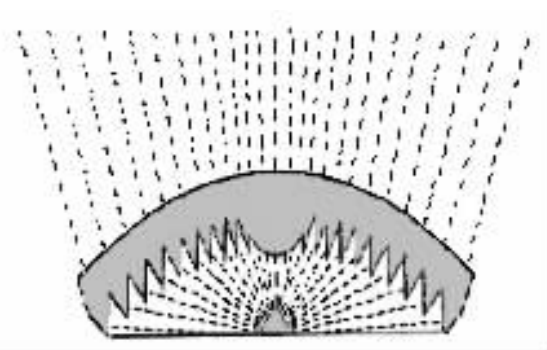


图 9 TIR-R 型聚光镜

Fig. 9 Total Internal Reflection-Refraction concentrator

## 4 聚光光伏系统中光伏电池的分类

聚光是降低光伏电池利用总成本的一种措施。通过聚光器使较大面积的阳光聚在一个较小的范围内形成“焦斑”或“焦带”,并将光伏电池置于“焦斑”或“焦带”上,以增加光强,克服太阳辐射能流密度低的缺陷,从而获得更多的电能输出。聚光光伏电池与普通光伏电池略有不同,因需耐高倍率的太阳辐射,特别是在较高温度下的光电

转换性能要得到保证,故在半导体材料选择、电池结构设计等方面都要进行一些特殊考虑。这里根据聚光比的要求对电池进行分类介绍<sup>[17]</sup>:

#### 1) 适用于低倍聚光比(1~100)的电池

如薄膜电池、单晶硅电池、多晶硅电池。薄膜电池很薄,可以制成叠层式以充分吸收太阳光,或采用集成电路的方法制造在一个平面上,用适当的掩模工艺,一次制作多个串联电池,以获得较高的电压。其存在的问题是光电转换不够稳定,所以尚未大量用作大型太阳能电源。这几种电池价格普遍较低,但转换效率亦较低,单晶硅为 24.7%;多晶硅为 19.8%;非晶硅(薄膜)仅为 14.5%。

#### 2) 适用于中倍聚光比(100~300)的电池

如多晶薄膜电池(背接触电池)。价格一般,转换效率一般为 14%~18%。

#### 3) 适用于高倍聚光比(300 以上)的电池

这类电池主要是多元化合物电池,多元化合物电池是指不是用单一元素半导体材料制成的光伏电池,通常是由 III-V 半导体制成的多节电池。现在各国研究的品种繁多,主要有硫化镉光伏电池、砷化镓光伏电池、铜铟硒光伏电池几种。这类电池需要特殊设计以适应高倍太阳光的照射,虽然价格较高,但转换效率也较高,可达到 25%~35% 或者更高。

## 5 聚光光伏系统的发展趋势

经过几十年的时间,可以看出聚光光伏系统的发展主要呈现两种趋势:

#### 1) 高倍聚光器+跟踪系统<sup>[1]</sup>

高倍聚光镜的接收角度一般都比较小,因此需要与跟踪系统相结合来保证聚焦效果,图 10 为西班牙 UPM 机构已经研制出来的聚光比为 1000 的光学元件,接收角为  $\pm 1.5^\circ$ ,光学系统的设计利用了非成像原理。这种聚光器可以由单一材料注塑成型,非常适合封装集成<sup>[29]</sup>。

#### 2) 低倍大角度聚光器+分光元件+多节电池

在标准的日光条件下,美国特拉华大学最新研制的光伏聚光系统(见图 11)转换效率达到了



图 10 西班牙 UPM 机构研制的聚光比为 1000 的非成像光学系统

Fig. 10 Nonimaging lens designed at UPM, Spain.

42.8%。电池采用了一种新型的横向光学聚焦系统,该系统将入射光分成高、中、低 3 个不同的能量束,分别照射到不同的感光材料上,这些感光材料总的吸收光谱则覆盖了整个太阳光谱。更重要的是,该聚焦系统包含一个静止的宽接收角光学系统,可以捕获大量的光能,而不需要复杂的跟踪装置<sup>[15-28]</sup>。

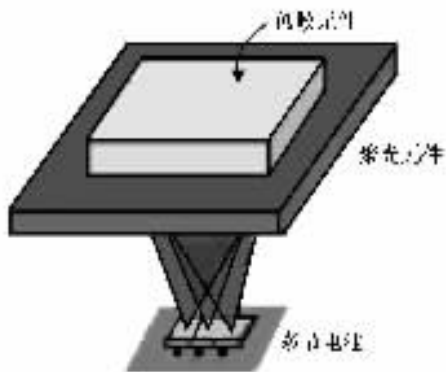


图 11 美国特拉华大学超高效硅太阳能电池元件示意图

Fig. 11 Schematic of lateral solar cell developed at University of Delaware in U. S. A.

## 6 跟踪系统

目前国内的光伏发电系统多为固定安装,该方式虽然控制、安装简便,但是由于大部分时间太阳光不能直射,造成利用率比较低。若对太阳光进行跟踪,使太阳光始终垂直照射在接收面,则接收到的太阳辐射将大大增加,从而达到提高光伏系统发电效率、降低成本的目的。

太阳的方位随着观测位置和观测时间的不同而不同,因此,欲跟踪太阳就必须先对太阳进行定位。进行定位可以使用光敏电阻或其他种类的传感器,组件的朝向对散射光线不很敏感,主要影响因素是太阳辐照中的直射部分。固定安装的太阳能电池组件在早、晚的光入射角都很大,而随着角度的继续增加,组件上的光学损失将增大。

跟踪方式有单轴跟踪和双轴跟踪两种,双轴跟踪比单轴跟踪能产出更多的电能,然而单轴跟踪实现起来比双轴跟踪更容易,制造和维护成本更低,所以在大部分场合可以使用单轴跟踪方式来节约成本。但无论是何种跟踪装置,都要确保传感器适应风、雨、冰雹等各种恶劣环境,即使其被浮尘和大雪覆盖,仍要保证正常跟踪。此外采用铸铝外壳加光学衰减片保护电路元件,可抗紫外线和高温。

Concentrix Solar 公司的跟踪系统采用了双轴跟踪,保证在一天中任何时刻阳光都直射在电池上,相比以往成功应用的跟踪系统,新的跟踪系统又有了改进,跟踪精度可达  $0.1^\circ$ 。同时跟踪系统也十分稳固,风速  $11 \text{ m/s}$  时仍能正常工作。

西班牙 Sol3g 公司的功率为  $4 \text{ kWp}$  的 S4000 高倍聚光光伏系统,由其公司研制的 M40 模块组成, M40 模块的电池转换效率为  $32\%$ ,模块组效率为  $24\%$ ,功率为  $27 \text{ Wp/m}^2$ 。整体跟踪装置采用 FEiNA SC16 跟踪器,精度为  $0.1^\circ$ ,寿命达 15 a 以上。

## 7 聚光光伏系统商业化所面临的问题

纵使聚光光伏发电系统的优点十分明显,并且试验也不断取得成功,但聚光光伏技术欲实现商业化,还需要深入研究以下几方面的问题<sup>[3,14,16,22]</sup>。

### 1) 光伏电池

当聚光比在 100 左右时,利用硅晶电池是比较合适的。但这种转换效率已经接近理论极限,没有更大的提升空间。当前的任务是如何在商业化生产过程中,在较低成本的情况下使产品的转换效率尽可能高。当聚光比达到 500 甚至更大时,使用多节 III-V 电池则更为合适。多节 III-V

电池从上世纪80年代到现在已经有了长足发展,当前的任务是如何能够低成本地生产出大批量的多节光伏电池,转换效率在适当的聚光比下为36%左右。

## 2) 聚光光学元件

到目前为止,已经生产、测试了很多种类的光学聚光器,包括平面、抛物面式反射镜,普通透镜和菲涅尔透镜,或者是含有二次聚光器的二次聚光系统,但是这些聚光器成本均比较高。当前的任务是如何能够使聚光光学系统更加稳定、使用寿命更长、成本降低。目前,普遍认为非成像的聚光光学系统是未来聚光光学系统的发展趋势。

## 3) 封装集成技术

未来的聚光系统的集成趋势是将聚光器和电池封装在一个不受气候影响的模块中,整个模块应具有机械性能稳定,长时间抗潮、抗冷、抗雨、抗风沙等特征。

## 4) 跟踪系统

跟踪系统在整个聚光光伏系统中所占的成本

是比较大的,并且与跟踪精度成正比,而跟踪精度又由聚光元件的接收角决定。在精度和成本间取得平衡,这是聚光光伏系统能否充分推广的重要因素。

## 8 结束语

随着全世界能耗的不断上升,滥用化石能源导致的环境污染日益严重,人类在应对经济持续发展的同时,还要着重关注生态平衡的问题。利用各种无污染的自然能源发电,将是人类未来能够持续生存和发展的重要手段之一。纵观太阳能利用的发展,无论是从光学元件还是光伏电池的演变历程,都可以看出聚光光伏发电将是未来主要的应用领域,并且非成像原理应用于聚光器件的设计将会变得更加普遍和成熟。因此,人类对于太阳能聚光光伏利用方面的探索和研究将更加积极,同时也预示着太阳能将在未来的社会中扮演越来越重要的角色。

## 参考文献:

- [1] GARBOUSHIAN V, GORDON R. Optical design considerations for high-concentration photovoltaics[J]. *SPIE*, 2006, 6339: 633905/1-9.
- [2] 薛国良. 非成像光学及其应用[J]. *物理通报*, 1995, 4: 1-2.  
XUE G L. Nonimaging optics and its applications[J]. *Wuli Tongbao*, 1995, 4: 1-2. (in Chinese)
- [3] SALA G, PACHÓN D, ANTÓN I. *Test, Rating and Specification of PV Concentrator Components and Systems*[M]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2002.
- [4] WINSTON R, JUAN C M, PABLO B. *Nonimaging Optics*[M]. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004.
- [5] GAN-ISON J D, DUFFL W S, O'GALLAGHER J J et al. Optimal non imaging integrated evacuated solar collector[J]. *SPIE*, 1993, 2016: 120-127.
- [6] 余海. 太阳能利用综述及提高其利用率的途径[J]. *新能源研究与利用*, 2004, 3: 34-37.  
YU H. Summarization of solar energy utilization and approaches to its utilization efficiency increase[J]. *Energy Research and Utilization*, 2004, 3: 34-37. (in Chinese)
- [7] 缪仁杰, 李淑兰. 太阳能利用现状与发展前景[J]. *应用能源技术*, 2007, 5: 28-33.  
LIAO R J, LI SH L. Actuality and prospect of solar energy's application[J]. *Appl. Energy Technology*, 2007, 5: 28-33. (in Chinese)
- [8] 胡兴军. 全球光伏产业的加速发展[J]. *华通技术*, 2007, 26(3): 36-39.  
HU X J. Accelerating development of global photo electric industry[J]. *Huatong Jishu*, 2007, 26(3): 36-39. (in Chinese)
- [9] 成志秀, 王晓丽. 太阳能光伏电池综述[J]. *信息纪录材料*, 2007, 8(2): 41-47.  
CHENG ZH X, WANG X L. The expatiates of the solar energy photovoahaic cell[J]. *Xinxi Jilu Cailiao*, 2007, 8(2): 41-47. (in Chinese)
- [10] MIÑANO J C, GONZÁLEZ J C. New method of design of nonimaging concentrators[J]. *Appl. Optics*, 1992, 31: 3051-

3060.

- [ 11 ] 宁铎,高继春.发展太阳能光伏发电的意义及前景[ J ].西北轻工业学报 2002 20( 1 ).82-84.  
NING D ,GAO J CH. The future and significance of the development of the solar energy in photovotogic area[ J ]. *J. Northwest University of Light Industry* 2002 20( 1 ) 82-84.( in Chinese )
- [ 12 ] GARCIA-BOTELLA A ,FERNANDEZ-BALBUENA A A ,BERNABEU E. Elliptical concentrators[ J ]. *Appl. Opt.* 2006 , 45 :7622-7627.
- [ 13 ] PARKYN W A ,PELKA D G. Compact non-imaging lens with totally internally reflecting facets[ J ]. *SPIE* ,1991 ,1528 : 70-81.
- [ 14 ] GORDON J M ,FEUERMAN D ,HULEIHIL M ,et al. . New optical systems for the solar generation of nanomaterials [ J ]. *SPIE* 2004 5185 99-108.
- [ 15 ] KATZ E A ,GORDON J M ,TASSEW W ,et al. . Ultra-high concentration effects in multi-junction solar cells[ J ]. *SPIE* , 2005 5942 59420P/1-6.
- [ 16 ] PÉREZ D ,MIÑANO J C ,BENÍTEZ P ,et al. . Design ,manufacturing and measurement of a PV miniconcentrator for front point-contact silicon solar cells[ J ]. *SPIE* 2005 5942 59420R/1-10.
- [ 17 ] IMENES A G ,MILLS D R. Spectral beam splitting technology for increased conversion efficiency in solar concentrating systems a review[ J ]. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2004 84 :19-69.
- [ 18 ] O'GALLAGHER J J . Comparative performance features of different nonimaging secondary concentrators[ J ]. *SPIE* , 1997. 3139 250-258.
- [ 19 ] PARKYN W A ,GLECKMAN P L ,PELKA D G. Converging TIR lens for nonimaging concentration of light from compact incoherent sources[ J ]. *SPIE* ,1993 2016 78-86.
- [ 20 ] MIÑANO J C ,GONZÁLEZ J C ,BENÍTEZ P. A high-gain ,compact nonimaging concentrator RX[ J ]. *Appl. Opt.* ,1995 , 34 :7850-7856.
- [ 21 ] MIÑANO J C ,GONZÁLEZ J C ,BENÍTEZ P. New non-imaging designs :the RX and the RXI concentrators[ J ]. *SPIE* , 1993. 2016 :120-127.
- [ 22 ] GLECKMAN P. A high concentration rooftop photovoltaic system[ J ]. *SPIE* 2007 6649 664903/1-10.
- [ 23 ] HERNÁNDEZ M ,BENÍTEZ P ,MIÑANO J C ,et al. . The XR nonimaging photovoltaic concentrator[ J ]. *SPIE* ,2007 , 6670 667005/1-10.
- [ 24 ] MIÑANO J C ,GONZALEZ J P P. Design of nonimaging lenses and lens-mirror combinations[ J ]. *SPIE* ,1991 ,1528 :104-115.
- [ 25 ] LIN J SH ,HUANG W CH ,HSU H CH ,et al. . A study for the special Fresnel lens for high efficiency solar concentrators [ J ]. *SPIE* 2005 5942 59420X/1-9.
- [ 26 ] PARKYN W A ,MUNOZ F ,MINANO J C ,et al. . Edge-ray design of compact etendue-limited folded-optic collimators [ J ]. *SPIE* 2004 5185 6-17.
- [ 27 ] DAVIES P A. Edge-ray principle of nonimaging optic[ J ]. *Opt. Soc. Am. A* ,1994 ,11 :1256-1259.
- [ 28 ] BIELAWNY A ,MICLEA P T ,RHEIN A V ,et al. . Dispersive elements for spectrum splitting in solar cell applications [ J ]. *SPIE* 2006 6197 619704/1-8.
- [ 29 ] KUDAEV S ,SCHREIBER P. Optimization of symmetrical free-shape non-imaging concentrators for LED light source applications[ J ]. *SPIE* 2005 5942 594209/1-10.
- [ 30 ] ALVAREZ J L ,HERNANDEZ M ,BENITEZ P ,et al. . TIR-R concentrator a new compact high-gain SMS design[ J ]. *SPIE* 2002 4446 32-42.

作者简介:刘华(1976—)女,辽宁抚顺人,博士,助理研究员,主要从事光学检测、光学设计、非成像光学方面的研究。

E-mail :girlliuhua@sohu.com。

卢振武(1955—)男,博士,研究员,主要从事衍射光学、非成像光学方面的研究。E-mail :Luzhenwu55@yahoo.

com.cn。