

文章编号 1004-924X(2009)12-2881-06

# 可横向分光的大接收角非成像式聚光系统

刘 华, 卢振武

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电技术研发中心, 吉林 长春 130033)

**摘要:**以传统聚光系统为基础的聚光电池虽然可以减少电池量,但需要精度高的跟踪装置,同时由于电池的吸收光谱较窄,而太阳光谱却较宽,会浪费很多能量。针对这种弊病,对横向非成像光学系统进行了研究,设计了两套接收角分别为 $6^\circ$ 和 $10^\circ$ ,聚光比分别为 30 和 20,电池接收面积均为 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ ,并能分光的聚光光学系统。设计结果表明,这些系统的光学效率在接收角范围内均大于 90%。该类系统拓宽了太阳光谱的吸收范围,降低了对跟踪系统的要求,与高效太阳能电池相结合,可制成高效、便携式、非跟踪太阳电池组件,为野外或战场上应用的技术装备提供电源,从而改善它们的灵活性、耐受性和有效性。

**关键词:**聚光电池;非成像聚光器;边缘光线原理

**中图分类号:**TH703;TK513.1 **文献标识码:**A

## Lateral splittable non-imaging concentrators with large acceptable angles

LIU Hua, LU Zhen-wu

*(Opto-electronics Technology Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics  
and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

**Abstract:** The photovoltaic cells based on traditional optical systems can reduce the amount of solar cell, but they need high accurate tracking systems. Moreover, a lot of energy will be lost, for the solar spectra are very wide while the absorbing spectra of photovoltaic cells are narrow. In order to overcome these drawbacks, a lateral non-imaging optical system is studied, and two kinds of concentrators with large acceptable angles and splitting characteristics are designed. The acceptable angles and concentration ratios of the concentrators are  $6^\circ$ , 30 and  $10^\circ$ , 20, respectively, and both the acceptable areas are  $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ . Experimental results show that the optical efficiencies of the designed systems are higher than 90% in the ranges of acceptable angles. Combined with solar cells, these kinds of concentrators can form high efficiency, non-tracking and portable PV modules, and can be used as power supplies for some special devices such as portable computers and imaging and measuring systems.

**Key words:** photovoltaic cell; non-imaging concentrator; edge ray principle

收稿日期:2008-12-25;修订日期:2009-01-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10704072);中国科学院知识创新工程重要方向项目

## 1 引言

当今世界对于清洁型能源的需求,使得太阳能的应用备受瞩目。太阳能的应用主要分为两个方面:热利用和光伏利用,其中光伏利用由于更加灵活、方便而被广泛采纳<sup>[1-2]</sup>。目前光伏利用多采用大面积方位固定的平板式光电转化模式,这一模式的广泛应用,有赖于大规模廉价光电池的供应。从目前情况来看,其降价空间已经很小。但是,如果能利用经济的聚光光学元件和高转化率的太阳能电池来形成聚光光伏电池组件,就可以用少量的聚光光伏电池,获得较多的电能<sup>[3-4]</sup>。不过聚光后由于接收角较小,往往需要跟踪系统来对太阳进行跟踪,从而又增加了成本,同时亦使电池组件结构庞大、笨重。另外,太阳光谱的波段约为  $0.305\sim 2.45\ \mu\text{m}$ ,如此宽的光谱波段,用一种材料制作的电池是无法全部吸收的。目前,为了扩宽吸收光谱范围,已经研制出多结电池<sup>[5-6]</sup>。这种电池用不同带隙的半导体材料层层堆积制成,其上层用高带隙材料,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;但是这种电池制作工艺复杂、价格昂贵。如果能够利用非成像聚光技术和分光技术,在大接收角范围内将不同波段的光聚集到相应的太阳能电池上,就可以利用不同材料的单结电池来进行光电转换,同时不需要跟踪<sup>[7-8]</sup>。美国特拉华大学最新研制的光伏聚光系统就属于这种形式。在标准的日光条件下,其转换效率达到 42.8%。但是他们的聚光、分光系统具体结构形式,却没有相关报道。

本文系统地研究了非成像光学理论以及各种分光方法,利用边缘光线原理设计了接收角为  $6^\circ$ 、聚光比为 30 的聚光系统,同时利用二向色膜的分光方法,将太阳光谱分为两个波段。该聚光系统在电池接收面上的能量分布均匀,接收角范围内光学透过率高,可达到 90% 以上。本文还设计了一套接收角为  $10^\circ$ 、聚光比为 20 的聚光、分光系统。虽然其聚光比和能量分布均匀性有所下降,但增大了接收角,光学透过率亦达到 90% 以

上。该系统与太阳电池相结合,便会形成高效、便携式、非跟踪太阳电池组件,为那些应用于野外或战场上的技术装备如笔记本电脑、成像、测量、通讯等设备提供电源,从而改善它们的灵活性、耐受性和有效性,具有广泛的应用空间。

## 2 非成像原理

与传统成像光学不同,非成像光学没有致力于如何消除像差和提高传递函数,而是将自由度应用到了如何保证能量总体传递效率和控制像面能量均匀度方面,因此非成像系统的像差一般很大。非成像系统与成像系统相比,最大的区别是在可以保证总体传递率的前提下实现较大的入射角和出射角。

光学扩展不变量( $\dot{E}tendue$ )是非成像光学中一个常用的概念,记为  $E$ 。任何光学系统都具有自身的光学扩展不变量,在系统中是一个与口径和角度有关的量。文中定义  $M_i$  为入射光束,  $M_o$  为出射光束,  $E(M_i)$  和  $E(M_o)$  分别表示入射光束和出射光束的扩展不变量,理想情况时有  $M_i = M_o$ ,  $E(M_i) = E(M_o)$ ,从而达到光束的完全耦合<sup>[2]</sup>,即所有入射光线最终均成为出射光线。为增加设计自由度,可简化所有的入射边缘光线,使其经过系统后均成为出射边缘光线,即非成像光学中常用的边缘光线原理。边缘光线原理叙述为:对于一个光学系统,通过入射口径边缘的光线也是通过出射口径边缘的光线,即保证入射光线全部为出射光线,能量传递率理论上可达到 100%<sup>[9]</sup>。

## 3 太阳光谱

太阳光谱是很宽的,照射到地面以后的光谱能量通常采用 AM1.5G 标准,见图 1。AM1.5G 太阳光谱辐照度是在自然光下,由地面阳光光谱标定方法得出的太阳光谱辐照度,由国家技术监督局发布(GB 6497-86)。AM1.5G 太阳光谱波段为  $0.305\sim 2.45\ \mu\text{m}$ ,光谱辐照度最大值为  $1599(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1})$ ,峰值主要集中在  $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$  波长附近,太阳总辐照度为  $100\ \text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

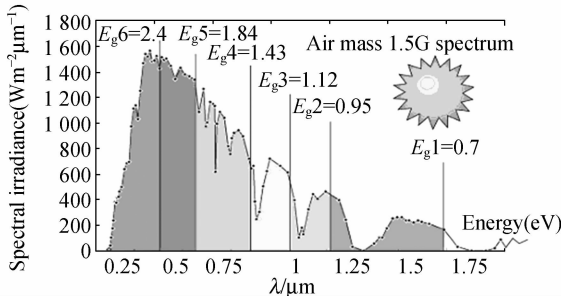
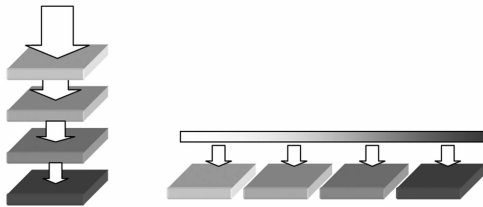


图 1 AM1.5G 太阳光谱

Fig. 1 AM1.5G solar spectrum

### 4 分光方法

根据太阳光谱的组成及光伏电池的能带吸收原理,如果能将太阳光谱分为几部分并且将其分别汇聚到对相应的吸收频带具有响应的光伏电池上,那么理论上可获得很高的转换效率。总体而言,有两种分光方法:一种是将电池在垂直方向上通过连接进行层叠排列分别吸收不同波长的光,形成垂直分光;另一种是利用分光元件如二向色镜将光分散到同一平面并排排列的电池上,形成横向分光。



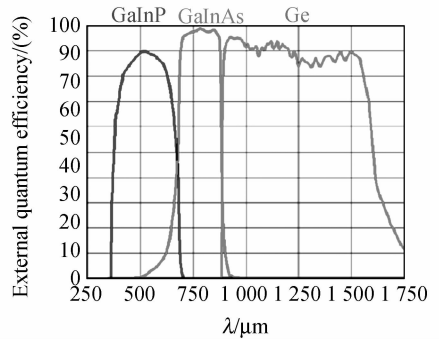
(a)垂直分光方法 (b)横向分光方法  
 (a)Vertical splitting (b)Lateral splitting

图 2 两种分光方法

Fig. 2 Two kinds of splitting methods

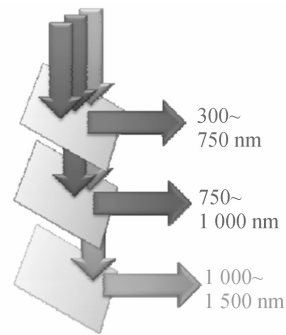
图 2(a)所示为垂直分光方法,太阳光直接照射的顶层(第一块电池)是吸收波段最宽的光伏电池,即转换效率最高的短波长波段。没有被顶层吸收的光传递到下一层,第二层是吸收波段处于第二位的,以此类推,从上往下,光的吸收量逐层递减。理论上来说,层叠的电池数量是可以任意的,直到完全吸收太阳光谱中的所有能量为止。但实际中,这种层叠式的电池构造十分复杂,每个电池的沟道连接,上下电池框架的吻合及顶层与底层电池的如何能同等程度进行冷却等问题都是

所面临的困难。图 2(b)所示为横向分光方法,这种方法是将光束分成几部分直接照射到不同的电池上。这种方法中,每一个电池都可以单独设计和制造,无需考虑层与层之间的吸收透过性和纵向的衔接误差,因此在理想分光系统的情况下,这种方法要比上一种转换效率高。目前的多结电池采用的是第一种分光方法,见图 3(a)。若将同样宽的光谱利用第二种分光方法分开,具体形式见图 3(b)。



(a)多结电池的光谱分光模式

(a) Splitting mode of multi-junction PV



(b)二向色镜的光谱分光模式

(b) Splitting modes of dichroic mirror

图 3 两种分光模式

Fig. 3 Two kinds of splitting modes

### 5 非成像聚光、分光系统

由于太阳的偏角是随时间变化的,如果不采取严格跟踪,就要求聚光镜的接收角足够大。实验研究表明,当接收角达到 6°时,可以采用简单的极轴跟踪;而当接收角达到 10°时,甚至不加跟踪,只需要每天人为调整几次即可极大地简化聚光电池的结构,形成便携式供电电源。聚光镜的接收角、聚光比、接收面上光斑质量等都是相互制

约的,往往接收角越大,聚光比越小,均匀性也越差。接收面上光能量的均匀性是由太阳能电池的性能决定的,一般认为最高能量密度不超过平均能量密度的 5 倍。如果聚光镜的接收角为  $6^\circ$ ,同时又要满足具有分光功能、接收面光能量分布均匀、系统不能过长等条件,聚光镜的聚光比不能大,可选择为 30。当接收角增大到  $10^\circ$  时,聚光比更小,可选择为 20,同时接收面光能量分布的均匀性降低。

本文利用边缘光线原理<sup>[10]</sup>,在数学计算软件 Matlab 中编写设计程序,并将其给出的结果输入到光学设计软件中进一步优化,建立系统模型,设计了接收角为  $6^\circ$ ,聚光比为 30,电池接收面积为  $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$  的聚光、分光系统,设计结果见图 4。系统包括 4 个元件:聚光透镜、二向色分光镜和两个非成像式匀光元件。不同入射角的太阳光经过聚光透镜后,照射到二向色分光镜上,使得波长大于  $885\text{ nm}$  的光透射,而小于  $885\text{ nm}$  的光反射,从而形成两路光。两路光分别照射到非成像式匀光元件上,将光均匀分散到太阳能电池表面,进行光电转换。电池背面附着在散热板上,以降低电池的工作温度。聚光透镜均制成方形,便于形成阵列排布,而更充分利用空间。反射光路横向排布在系统中间,但所需空间很小,不会阻挡光线。聚光透镜材料为 PMMA,分光镜材料为 BK7,非成像匀光透镜材料为 BK7,各元件表面均镀 AR 膜。电池接收面上的能量分布均匀,见图 5,接收角范围内光学透过率高,达到  $90\%$  以上,见图 6。这里光学透过率的计算是根据 AM1.5G 太阳光谱辐照度分布情况,考虑光学元件表面菲涅耳损失和材料吸收以后得到的。

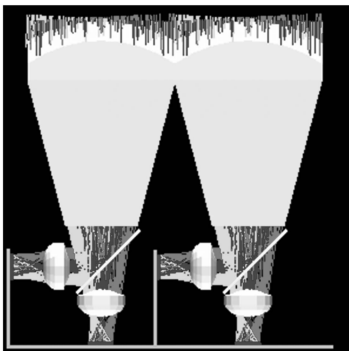
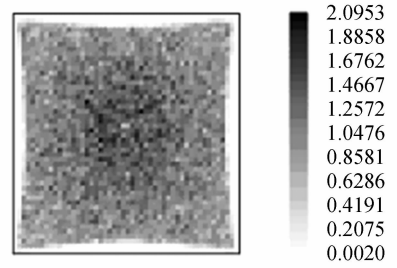
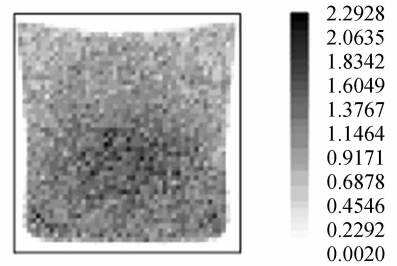


图 4 接收角为  $6^\circ$ 、聚光比为 30 的聚光、分光系统  
Fig. 4 Concentrator system with  $6^\circ$  acceptance angle and  $30\times$  concentration



(a) 垂直照射  
(a) By vertical irradiation



(b)  $3^\circ$  照射  
(b) By  $3^\circ$  incident sunlight

图 5 电池接受面上的能量分布  
Fig. 5 Energy distribution on solar cell with normal incident sunlight

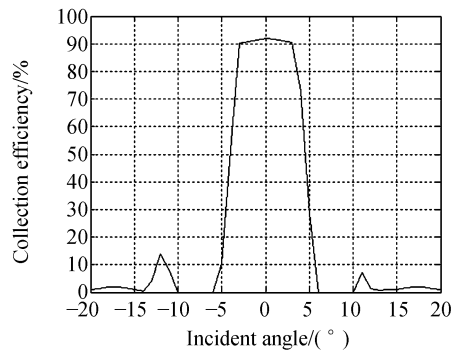


图 6 不同入射角对应的光学透过率  
Fig. 6 Optical collection efficiencies vs. incident angles

为了进一步扩大接收角,本文降低聚光比和能量分布均匀性,改变非成像式匀光元件的形式,又设计了一套聚光、分光系统,见图 7。该系统接

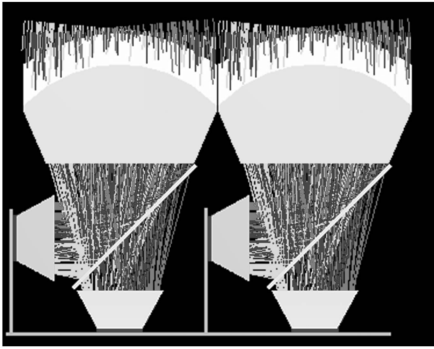
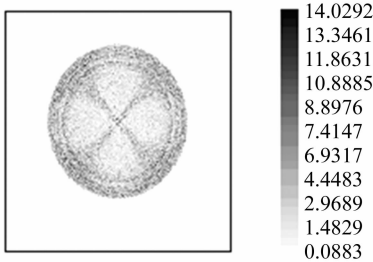


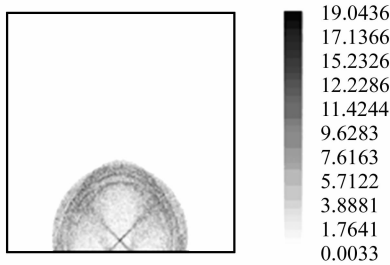
图 7 图 4 接收角为 10°、聚光比为 20 的聚光、分光系统

Fig. 7 Concentrator system with 10° acceptance angle and 20× concentration



(a) 垂直照射

(a) By vertical irradiation



(b) 5°照射

(b) By 5° incident sunlight

图 8 图 5 电池接受面上的能量分布

Fig. 8 Energy distribution on solar cell with normal incident sunlight

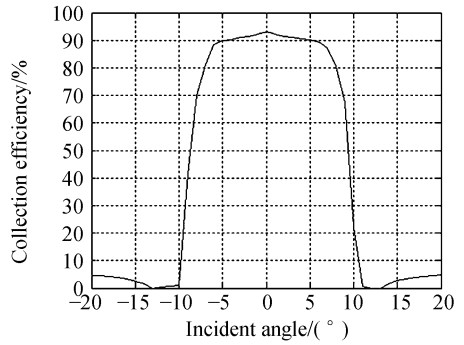


图 9 不同入射角对应的光学透过率

Fig. 9 Optical collection efficiencies vs. incident angles

收角为 10°、聚光比为 20、电池接收面积为 1 cm × 1 cm。电池接收面上的能量分布均匀,见图 8,接收角范围内光学透过率高,均达到 90% 以上,见图 9。接收面上能量分布虽然不均匀,但由于聚光比低,并不会对电池性能造成影响。

### 6 结 论

本文利用非成像光学相关理论和边缘光线相空间对应方法设计了大接收角、可横向分光的太阳能聚光系统。该聚光系统接收角为 6°、聚光比为 30,在电池接受面上的能量分布均匀,接收角范围内光学透过率高。同时还设计一套接收角为 10°、聚光比为 20 的聚光、分光系统。虽然其聚光比和电池接收面上能量分布均匀性有所下降,但增大了接收角,光学透过率亦在整个接收角范围内均大于 90%。此种系统不仅拓宽了太阳光谱的吸收范围,而且降低了对跟踪系统的要求,与高效太阳电池相结合,可形成高效、便携式、非跟踪太阳电池组件,具有较广阔的应用前景。

### 参考文献:

[1] 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]. *Huatongjishu*, 2007, 26(3): 36-39. (in Chinese)  
[2] 宁锋, 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 photovoltaic area [J]. *Journal of Northwest University of Light Industry*, 2002, 20(1): 82-84. (in Chinese)
- [3] FERNANDO B P, JUAN C M. Light prescriptions innovators, Irvine CA, edge-ray design of compact etendue-limited folded-optic collimators [J]. *SPIE*, 2004, 5185: 6-17.
- [4] PARKYN W A, PELKA D G. Compact non-imaging lens with totally internally reflecting facets [J]. *SPIE*, 1991, 1528: 70-81.
- [5] KING R R. Multijunction cells: record breakers [J]. *Nature Photonics*, 2008(2): 284-286.
- [6] ANSCOMBE N, OLIVER G. Technology focus: photovoltaics [J]. *Nature Photonics*, 2008(2): 275-292.
- [7] BARNETT A, GOOSSEN C B, KIAMILEV K F, *et al.*. Milestones toward 50% efficient solar cells [C]. *22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy*, 2007.
- [8] JASON H K, JOSEPH E F. Multiband solar concentrator using transmissive dichroic beamsplitting [J]. *SPIE*, 2008, 7043: F1-8.
- [9] WINSTON R, JUAN C M, PABLO B. *Nonimaging Optics* [M]. New York: Elsevier Academic Press, 2004.
- [10] 朱瑞, 卢振武, 刘华, 等. 基于非成像原理设计的太阳能聚光镜 [J]. *光子学报*, 2008, 31(8): 45-47. ZHU R, LU ZH W, LIU H, *et al.*. The solar concentrator design method based on nonimaging optics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 31(8): 45-47. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘 华(1976—),女,辽宁省抚顺市人,博士,副研究员,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,吉林白城人,研究员,博士生导师,主要从事衍射光学方面的研究。E-mail: luzw@ciomp.ac.cn

#### ●下期预告

## OLCR 技术实现光纤光栅分布式复杂应变测量

沈小燕,林玉池,赵美蓉,王 为

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

为解决用 FBG 测量非均匀轴向应变时反射波谱形状改变,无法用测量 Bragg 波长的方法来解调的问题,对光学低相干技术(OLCR)进行了研究。OLCR 测试系统以一套扫描 Michelson 干涉仪为核心,实现光纤光栅脉冲响应的测量,经傅里叶变换,将脉冲响应转化为失调范围内的频率响应,采用光栅重构技术,获得光栅沿轴向各段的复耦合系数,从而由复耦合系数得到沿轴向各段的 Bragg 波长,最后根据 FBG 的传感模型来获得沿轴向的应变分布。结合一套实用的时分复用 OLCR 系统,详细论述了 OLCR 工作原理和测量实现过程。该系统用于复合层板 I 型层断裂试验中 FBG 应变传感器的测量,得到了断裂过程中的轴向应变分布,结果切实可靠。FBG 上的平均应变测量精度为  $13.2 \mu\text{m}$ ,系统的轴向扫描精度可达到 100 nm。实验证明 OLCR 能够很好地实现 FBG 的复杂应变测量,具有很好的应用前景。