

# 聚光光伏系统\*

陈诺夫<sup>1,2,†</sup> 白一鸣<sup>1</sup>

(1 中国科学院半导体研究所 半导体材料科学重点实验室 北京 100083)  
(2 中国科学院力学研究所 国家微重力实验室 北京 100080)

**摘要** 随着传统化石类能源的枯竭和环境污染的日益严重,太阳能光伏发电技术倍受瞩目,但较高的发电成本及原材料的缺乏制约了其大规模发展.以高转换效率、低芯片消耗为核心的聚光光伏技术,在降低光伏发电成本方面被人们寄予厚望.文章主要介绍了聚光光伏系统发展的历史和现状,工作原理及存在的关键问题,并对其发展前景进行了展望.

**关键词** 聚光光伏系统,太阳电池,聚光器,跟踪系统

## Concentrating photovoltaic system

CHEN Nuo-Fu<sup>1,2,†</sup> BAI Yi-Ming

(1 Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)  
(2 National Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** With the exhaustion of conventional fossil fuels and serious environment pollution, solar photovoltaic technology has attracted worldwide attention, but it is still limited by its high cost of power generation and material shortage. Concentrating photovoltaic technology is promising for lowering the cost of power generation with its advantages of higher photovoltaic conversion efficiency and lower consumption of solar cells. This paper begins with a detailed introduction to the history, current status, and principle of concentrating photovoltaic systems, followed by a detailed discussion of its key market barriers and future potential.

**Keywords** concentrating photovoltaic system, solar cell, concentrator, tracker

## 1 引言

在能源问题日益突出的今天,太阳能,作为一种取之不尽、用之不竭、清洁无污染的绿色能源,对其有效开发利用已成为实现能源可持续发展的重中之重<sup>[1-3]</sup>.在太阳能的有效利用当中,太阳能发电技术是近年来发展最快、最具活力的研究领域之一.

经过各国光伏工作者的不懈努力,到目前为止,第一代晶体硅太阳电池的实验室效率达到了24.7%,大规模生产商用产品的效率为17%以上<sup>[4-7]</sup>.尽管如此,由于受单晶硅材料价格及繁琐的加工工艺限制,致使单晶硅太阳电池成本居高不下.

第二代薄膜太阳电池也取得了令人瞩目的成就,CuInSe<sub>2</sub>和CdTe等薄膜电池的实验室效率目前分别为16.5%和18.5%<sup>[4,7,8]</sup>,虽然仍有望在效率上进一步突破,但前者稳定性差,后者又较难制作.非晶硅及氢化非晶硅的来源较广,但是转换效率较低,且大面积薄膜制作也存在价格高的问题.相比之下,GaAs基的太阳电池30%乃至更高的效率独具优势<sup>[9]</sup>,但是砷化镓的材料成本远高于硅电池的材料成本,而电池片的价格是光伏系统成本最主要的部分.因此,高额成本成为制约光伏发电大规模应用的

\* 2007-08-28 收到

† 通讯联系人, Email: nfchen@semi.ac.cn

主要障碍。

为了进一步降低光伏发电成本,减少太阳电池芯片的消耗,聚光技术是一项可行的措施,即通过采用廉价的聚光系统将太阳光会聚到面积很小的高性能光伏电池上,从而大幅度地降低系统的成本及昂贵的太阳电池材料用量<sup>[10-13]</sup>。理论估算表明,聚光光伏发电成本完全可以达到大规模应用所能接受的价格范围<sup>[14]</sup>。

各国光伏工作者也在不断地以实验结果验证聚光技术,这将在提高太阳电池转换效率的前提下,大幅度降低电池片的消耗量和光伏发电成本的最有效方案。早在1989年,GaAs/GaSb机械叠层双结太阳电池的效率已达32.6%(大气质量因子AM1.5,

100suns)<sup>[15]</sup>。1995年,Fraunhofer ISE和Calibration实验室研制的Ga<sub>0.51</sub>In<sub>0.49</sub>P/GaAs整体级联双结太阳电池,效率为31.1%(AM1.5,300suns)<sup>[16]</sup>。2005年5月,美国可再生能源实验室报道其三结太阳电池在10倍聚光条件下的效率为37.9%<sup>[17]</sup>。2005年6月,美国Spectrolab公司报道其多结太阳电池在236倍聚光条件下的效率为39%<sup>[18]</sup>。2006年12月,该项世界纪录又被其刷新为40.7%,这次突破可使安装成本降至3美元/W,发电成本约8—10美分/kWh,这在利用太阳光发电方面树立了新的里程碑<sup>[19]</sup>。表1给出了截止到2006年底报道的各种地面应用聚光太阳电池和模块的效率<sup>[20]</sup>。

表1 2006年底各种地面应用聚光太阳电池和模块效率<sup>[20]</sup>

聚光太阳电池分类		效率(%)	面积/cm <sup>2</sup>	强度聚光比/suns	测试中心(和时间)
单结电池	GaAs	27.8 ± 1.0	0.203	216	Sandia(1988年8月)
	Si	26.8 ± 0.8	1.60	96	FhG-ISE(1995年10月)
	Si	27.6 ± 1.0	1.00	92	FhG-ISE(2004年11月)
	GIGS(薄膜)	21.5 ± 1.5	0.102	14	NREL(2001年2月)
多结电池	GaInP/GaAs/Ge(2端)	34.7 ± 1.7	0.267	333	NREL(2003年9月)
	GaInP/GaInAs/Ge(2端)	39.3 ± 2.3	0.378	179	NREL(2006年8月)
	GaInP/GaInAs/Ge(2端)	40.7	-	236	Spectrolab(2006年12月)
子组件	GaInP/GaAs/Ge	27.0 ± 1.5	34	10	NREL(2000年5月)
组件	Si	20.3 ± 0.8	1875	80	Sandia(1989年4月)

为了打开实用化的市场,美国Amonix公司和SunPower公司经过15年的不断努力,近期开发了20kW的点聚焦菲涅尔透镜阵列<sup>[21]</sup>,该系统安装在PVUSA和亚利桑那州的STAR公共服务机构。Solar Research公司一直致力于反射圆盘式聚光光伏系统,自1996年至今,他们先后在Whitecliffs, South Australia, Aboriginal lands, Hermannsburg, Yuendumu和Lajamanu建成了这种聚光光伏电站,用于提供该地区人民所需的电力<sup>[22]</sup>。Entech公司自从联邦光伏计划启动以来,一直致力于线聚焦菲涅尔透镜光伏系统的研究<sup>[23]</sup>。马德里Polytechnical研究组研究和开发了一种新型的RXI(refraction-reflection-internal reflection)聚光光伏系统,应用这个系统,其发电成本为0.104欧元/kWh,对于1000MW系统,其发电成本为0.033欧元/kWh<sup>[24]</sup>。西班牙也于2006年在北部的纳瓦拉安装了由400个太阳能跟踪系统组成的“聚光太阳能花园”,他们声称该系统比传统平板光伏系统能源输出增加了35%<sup>[25]</sup>。

与发达国家相比,我国聚光光伏系统研究工作起步较晚,研究水平与发达国家也存在一定的差距。因此,如何在聚光光伏领域取得突破性研究进展,我国光伏工作者任重道远。本文主要介绍聚光光伏系

统的原理、系统核心组件及存在的关键问题,并对其发展前景进行了展望。

## 2 聚光光伏系统的原理

通过聚光来提高太阳电池效率并降低发电成本的概念是简单直接的。图1阐明了聚光光伏技术的原理。在聚光条件下,一方面,电池芯片单位面积接收的辐射功率密度大幅度地增加,太阳电池光电转换效率得以提高;另一方面,对于给定的输出功率,可以大幅度降低太阳电池芯片的消耗,从而降低系统的成本。下面对这两方面进行详细的分析。

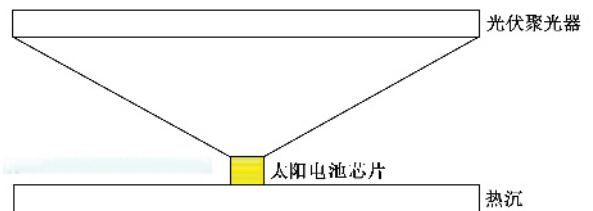


图1 聚光光伏技术原理图

### 2.1 聚光使太阳电池的性能提高

在聚光情况下,太阳电池性能的提高主要得益于电池开路电压和光生电流的提高<sup>[26,27]</sup>。首先,在

非聚光条件下,太阳电池的电流-电压关系为

$$V_{OC} = m \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right), \quad (1)$$

或

$$I = I_{SC} - I_0 \left( e^{mV/KT} - 1 \right), \quad (2)$$

其中  $V_{OC}$  为开路电压  $I_{SC}$  为短路电流  $I_0$  为暗电流  $m$  为考虑光生载流子各种复合过程的理想因子,一般情况下  $1 < m < 2$ . 太阳电池的光电转换效率为电池的最大输出功率与入射太阳光功率  $P_m$  的比值,可以表示为

$$\eta = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{P_{in}}, \quad (3)$$

其中  $FF$  为填充因子,它表示电池输出特性曲线的“方形”程度.

在聚光情况下,假设光生电流与太阳电池的聚光比成正比,与(1)式和(2)式对比可得到聚光太阳电池的电流-电压关系为

$$V_{OCX} = V_{OC} + m \frac{kT}{e} \ln X, \quad (4)$$

$$I_X = x I_{SC} - I_0 \left( e^{mV/kT} - 1 \right), \quad (5)$$

转换效率可表示为

$$\eta = \frac{V_{OCX} I_{SCX} FF}{x P_{in}}, \quad (6)$$

其中  $x$  为太阳电池的聚光比.

假定串联电阻较小,通过对太阳电池单指数模型进行数学处理,可得到聚光条件下的最大转换效率为

$$\eta_M = \frac{mkT}{e} \frac{I_{SC}}{P_{in}} \left[ 1 - \frac{mkT}{eV_{OC}} \left[ \ln \left( I_{SC}/I_0 \right) + \ln x \right] \right], \quad (7)$$

由(7)式可见,转换效率随着聚光比增加而呈对数型增加.

## 2.2 聚光使光伏发电成本降低

对于光伏发电,太阳电池芯片的价格决定了聚光系统中约 50%—55% 的成本,所以如果可以大幅度地降低电池芯片的消耗,便可以大幅度地降低系统发电成本<sup>[28]</sup>.

低电池芯片消耗是推动聚光光伏技术进入光伏市场的最主要动力.下面给出一个最简单的例子来说明聚光使太阳电池芯片的消耗降低.对于非聚光的平面电池,在 AM1.5 光谱的辐照下,直径为 10cm 的太阳电池芯片可以接收到 6.67W 的能量.而对于

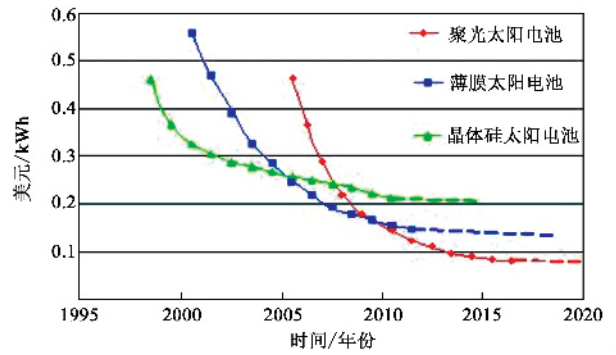


图2 聚光太阳电池、薄膜太阳电池与晶体硅太阳电池发电成本预测对比图

同样大小的晶片可以制作出 52 个  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  的聚光太阳电池,假设聚光器工作在 100 倍聚光条件下,透镜透光率为 85%,要想输出同样大小的功率,仅需 1 个  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  的电池芯片.国内外许多光伏工作者都对聚光技术使光伏发电成本的降低做了研究,图 2 给出了聚光太阳电池、薄膜太阳电池以及晶体硅太阳电池发电成本的对比关系.由图可见,聚光太阳电池在降低光伏发电成本方面具有极大的潜力.

## 3 聚光光伏系统的核心组件及存在的关键问题

目前,非聚光型的光伏系统在光伏市场上还占据了主导地位.这主要是因为聚光光伏系统还存在一些关键的科学技术问题没有得到完全解决.最主要的原因是因为聚光光伏系统需要高精度的太阳同步跟踪装置,没有平板光伏技术可靠,其维护费用相对也较高<sup>[29]</sup>.其次是聚光光伏系统各组件依然存在一些问题也还未完全得到解决<sup>[30]</sup>.

### 3.1 聚光太阳电池芯片

聚光光伏系统最核心的聚光太阳电池芯片,主要存在两大问题亟待解决<sup>[31]</sup>:一是降低电池的串联电阻;二是低电阻、低电流损失隧道结的实现<sup>[30]</sup>.首先,在高倍聚光条件下,串联电阻是影响电池效率的一个主要参数.隧道结是影响太阳电池性能的另一个重要参数,作为各个子电池的联接枢纽,隧道结是实现各子电池的电流匹配及耐高温问题的关键.目前,降低串联电阻的工作主要应围绕两个方面开展:(1)优化电池结构,包括各层的厚度和掺杂水平等,以及高电流、低电阻、低损耗隧道结的设计,以减少

电池的体电阻 (2) 在电池结构确定即体电阻消耗确定的情况下, 优化电极栅线厚度、宽度及分布, 以减小顶层接触电阻损耗。

与平板太阳电池相比, 聚光光伏系统的核心部件除了高效太阳电池芯片以外, 还包括光伏聚光器和对日跟踪器。

### 3.2 光伏聚光器

光伏聚光器是利用透镜或反射镜将太阳光聚焦到太阳电池上。按光学类型划分, 常用的聚光系统通

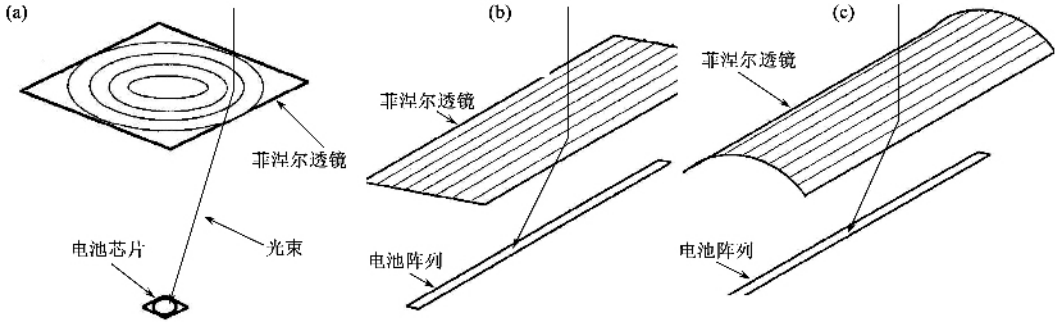


图3 (a)点聚焦结构菲涅尔透镜 (b)线聚焦结构菲涅尔透镜 (c)线聚焦结构圆顶型菲涅尔透镜

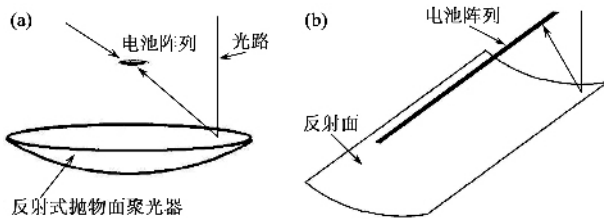


图4 (a)点聚焦结构抛物面反射镜;(b)线聚焦结构抛物面反射镜

在实际应用中, 为了增加聚光比, 或者增加聚光光束的入射角, 常常使用二级光学元件。二级光学元件不仅可以放宽初级光学元件的制造精度和聚光器的对准精度, 而且降低了对高精度跟踪系统的投资, 既降低了聚光光伏系统的成本又提高了系统的可靠性<sup>[32-36]</sup>。图5所示为中国科学院半导体研究所研制的组合式聚光器。该组合式聚光器由点聚焦菲涅尔透镜和导光筒组成。点聚焦菲涅尔透镜作为初级光学元件, 可以获得较大的聚光比, 导光筒作为二级光学元件, 可将偏离电池的太阳光通过筒内壁镜面反射器的多次反射重新投射到太阳电池表面上, 实现阳光的正向照射, 从而提高了太阳能利用率和太阳电池的光电转换效率。该研究小组对图6所示的带有组合式聚光器的原理样机的电功率输出特性随入射角的变化关系进行了测试, 在 AM1.5 和 400 倍聚

常分为折射聚光系统和反射聚光系统。对于实际应用来说, 菲涅尔透镜成为理想之选。它的聚焦方式可以是点聚焦, 也可以是线聚焦。点聚焦时, 将太阳光聚焦在一个太阳电池片上, 线聚焦时, 将太阳光聚焦在太阳电池组成的线阵列上。各种结构的菲涅尔透镜如图3所示。反射式聚光系统也可以分为点聚焦结构和线聚焦结构, 如图4所示。但是传统菲涅尔透镜存在难以实现的高接收角、聚光后光强分布不均匀和易老化变形等问题。而反射式聚光器聚光倍数较低, 难以大幅度降低发电成本。

光条件下, 测试结果表明, 当输出功率为峰值功率的90%时, 其可接收角为  $\pm 4.23^\circ$ 。与传统折射式聚光器相比, 该系统具有较高的接收角, 可极大地提高聚光光伏系统户外运行的稳定性和可靠性, 且便于安装和维护。目前, 该项技术装机成本约为 30 元/W, 随着技术的逐步提高, 2020 年有望降至 15 元/W 以下, 届时, 其发电价格可与火电发电成本相当。

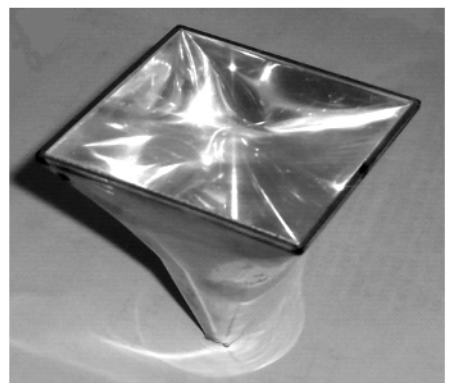


图5 组合式聚光器

### 3.3 对日跟踪器

对于高效聚光光伏系统来说, 对日跟踪器必不可少。这主要是由于随着聚光比的提高, 聚光光伏系统所接收到光线的角度范围就越小, 为了更加充分地利用太阳光, 聚光光伏系统必须辅以对日跟踪装



图6 聚光太阳电池原理样机

置。能够精确地跟踪太阳且价格低廉的对日跟踪装置一直是光伏工作者研究的热点之一<sup>[37]</sup>。目前,对日跟踪器的设计方案众多,形式不拘一格。点聚光结构的聚光器一般要求双轴跟踪,线聚光结构的聚光器仅需单轴跟踪。

单轴跟踪一般分为水平轴旋转结构或极轴旋转结构,如图7所示。常用的四种双轴跟踪系统如图8所示。第一种为立柱形式,如图8(a)和(b)所示。它采用立柱支撑一个平面跟踪聚光阵列结构。它在竖直方向和水平方向进行跟踪。这种结构的优点是安装简单,其缺点是中心传动齿轮会受风力的巨大力矩影响。第二种形式为滚动-倾斜结构,如图8(c)所示。风力对这种结构影响减小很多,但是这需要更多的转动和连接机构。为了获得大数目的水平支撑单元,要求转轴有很高的硬度。在安装时,这种结构要求多个基座必须对准。转轴必须沿南北方向放置,这样可以通过调节转轴使阴影最小化。第三种形式也采用滚动-倾斜结构。它由菲涅尔透镜模块和框架组成,如图8(d)所示。第四种常用结构为转盘形式,如图8(e)所示。这种结构高度和风力影响都最小。因此,能够采用小的驱动元件和支撑单元。但是,它的安装也最复杂。

由于聚光光伏系统不得不经受安装地区恶劣的气候条件,如风、沙、冰雹、雨、雪等的侵蚀和损坏,因此,跟踪系统的可靠性仍需进一步的提高<sup>[29]</sup>。

#### 4 前景展望

在各国政府的大力支持下,以及光伏市场的需求和聚光光伏技术迅猛提高的趋势下,高效、低廉、可靠、稳定的聚光光伏发电系统正在逐步走向产业化。2004年,世界光伏市场上聚光光伏系统年装机

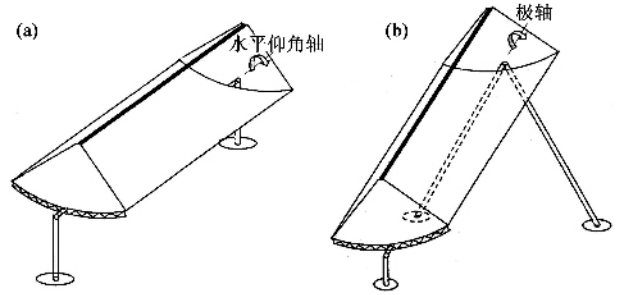


图7 (a)水平轴反射槽形式的单轴跟踪系统 (b)极轴反射槽形式的单轴跟踪系统

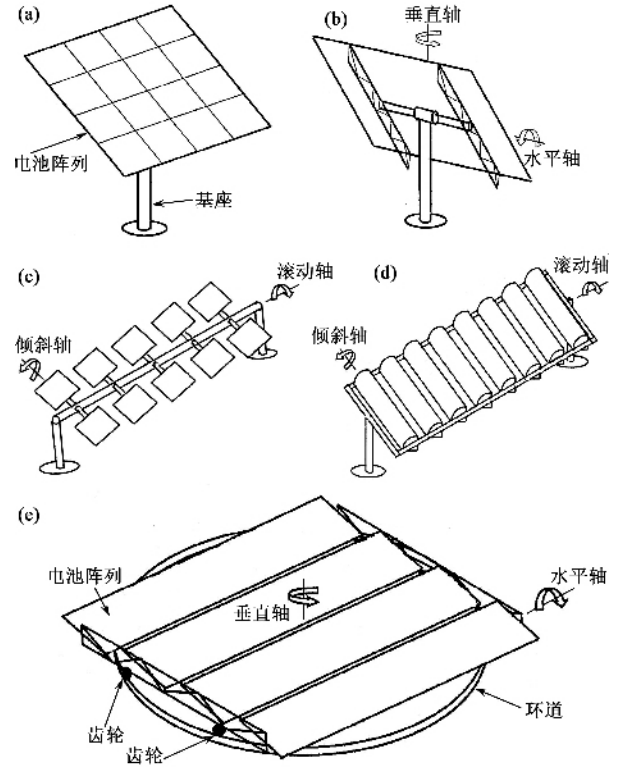


图8 双轴跟踪器 (a)、(b)立柱式双轴跟踪系统 (c)中心转矩滚动-倾斜形式双轴跟踪系统 (d)框架滚动-倾斜形式双轴跟踪系统 (e)转盘形式双轴跟踪系统

量仅为1MW,2006年,聚光光伏系统的年装机量为18MW,虽然数字上不是一个飞跃,远远低于平板光伏电池的装机量,但随着聚光光伏技术的逐步发展,这一新型可再生能源系统将很快走向产业化。

在国际光伏市场巨大潜力的推动下,中国作为世界能源消耗第二大国,对于高效、低成本的光伏发电系统的需求更为迫切。目前,我国光伏产业正以每年30%的速度增长,国内光伏电池生产能力已超过1600MW。但是,我国光伏发电的应用却远远低于国际平均水平。与国际上蓬勃发展的光伏发电相比,国内平板式光伏发电系统技术已比较成熟,而聚光光

光伏发电系统还处于技术开发阶段,只要我们抓住有利时机,瞄准国际光伏电池新材料及器件研究的前沿,就能在聚光光伏技术及应用方面取得突破性进展。

在本文即将完成的时候,又欣喜地看到以美国特拉华大学等二十几个单位组成的超高效太阳能电池开发集团正在研究开发转换效率为50%的超高效转换效率太阳能电池。目前转换效率已经突破42.8%<sup>[38]</sup>。

### 参 考 文 献

[ 1 ] 罗运俊,何梓年,王常贵. 太阳能利用技术. 北京:化学工业出版社,2005. 前言 [ Luo Y J, He Z N, Wang C G. Technology for Solar Energy Utilization. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. Introduction( in Chinese ) ]

[ 2 ] Marti A, Luque A. Next Generation Photovoltaics, High Efficiency through Full Spectrum Utilization. Institute of Physics Publishing, 2002, 2-7

[ 3 ] Hamakama Y. Thin-Film Solar Cells, Next Generation Photovoltaics and Its Applications Berlin Heidelberg, :Springer-Verlag, 2004. 2-4

[ 4 ] Green M A, Emery K, King D L *et al.* Prog. Photovolt, 2002, 10: 355

[ 5 ] Zhao J, Wang A, Green M *et al.* Appl. Phys. Lett., 1998, 73, 1991

[ 6 ] Hamakawa Y. Solar PV Energy Conversion and 21st Century's Civilization. 12th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, JEJU, Korea, 2001

[ 7 ] 薛钰芝,张力,林纪宁,大连铁道学院学报,2003,24(4): 71 [ Xue Y Z, Zhang L, Lin J N. Journal of Dalian Railway Institute, 2003, 24(4): 71 ]

[ 8 ] Hamakama Y. Thin-Film Solar Cells, Next Generation Photovoltaics and Its Applications, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2004 24-30

[ 9 ] Yamaguchi M. Solar Energy Material & Solar Cells, 2003, 75: 261

[ 10 ] Antonio M, Antonio L. Next Generation Photovoltaics High Efficiency through Full Spectrum Utilization. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2002. 64

[ 11 ] Hein M, Dimroth F, Siefer G. *et al.* Solar Energy Material & Solar Cells, 2003, 75: 277

[ 12 ] Andreev V M, Grilikhes V A, Khvostikov V P *et al.* Solar Energy Material & Solar Cells, 2004. 84: 3

[ 13 ] Rumyantsev V D *et al.* 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Dresden, 2006

[ 14 ] Letay G, Bett A W. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Munich, 2002. 178

[ 15 ] Fraas L M, Avery J E, Sundaram V S *et al.* Proc. of the 21st IEEE Photovoltaic Spec Conf. New York, 1990. 190

[ 16 ] Marti A, Luque A. Next Generation Photovoltaics, High Efficiency through Full Spectrum Utilization. Institute of Physics Publishing, 2002. 120-122

[ 17 ] Wanlass M W *et al.* Proceedings of the International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity of Hydrogen. Scottsdale, Arizona, USA ( CD-ROM ). NREL Report No. CD-520-38172 ( in preparation 2005 )

[ 18 ] Mcconnell R D, Symko-Davis M. Plenary presentation at the 20th European PV Solar Energy Conference and Exhibition. Barcelona, Spain, June 2005

[ 19 ] King R R, Law D C, Edmondson K M *et al.* Appl. Phys. Lett., 2007, 90: 183516

[ 20 ] Martin A G, Keith E, David L K *et al.* Prog. Photovolt: Res. Appl., 2007; 15: 35

[ 21 ] <http://www.amonix.com>

[ 22 ] <http://www.solarsystems.com.au>

[ 23 ] O'Neill M, Danal A. Fourth-Generation Concentrator Systems: form the Lab to the Factory to the Field. Presented at Proc. First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Hawaii, 1994

[ 24 ] Tilford C *et al.* Development of a 10 kW Reflective Dish PV System. In: Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 1993. 1222-1227

[ 25 ] [http://www.sparksdata.co.uk/refocus/fp\\_showdoc.asp?docid=95826357&accnum=1&topics=/Spain commissions its largest solar PV facility](http://www.sparksdata.co.uk/refocus/fp_showdoc.asp?docid=95826357&accnum=1&topics=/Spain%20commissions%20its%20largest%20solar%20PV%20facility)

[ 26 ] Luque A. Solar cells and optics for photovoltaic concentration. England: IOP Publishing Ltd, 1989. 103-111

[ 27 ] Marti A, Luque A. Next Generation Photovoltaics, High Efficiency through Full Spectrum Utilization. Institute of Physics Publishing, 2002, 108-112

[ 28 ] Andreev V M. Photovoltaics Conversion of Concentrated Sunlight, PPT

[ 29 ] Swanson R M. Photovoltaic Concentrators in Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Eds. Antonio L, Steven H. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2003. 449-452

[ 30 ] Swanson R. Prog. Photovolt. Res. Appl., 2000 8: 93

[ 31 ] Marti A, Luque A. Next Generation Photovoltaics, High Efficiency through Full Spectrum Utilization. Institute of Physics Publishing, 2002. 109-110

[ 32 ] Kaminar N *et al.* A Passive Cooled 1000X GaAs Module with Secondary Optics. In: Proceedings of the 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. San Diego, CA, IEEE, New York, 1982. 675-678

[ 33 ] 李晓婷. GaInP<sub>2</sub>/GaAs/Ge 双结级联太阳能电池 MOCVD 生长和聚光器的制作研究. 中国科学院西安光学精密机械研究所硕士论文, 50-52 [ Li X T. Study of Double Junction of Tandem GaInP<sub>2</sub>/GaAs/Ge Growth with MOCVD and Concentrator. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Master Thesis, 50-52( in Chinese ) ]



[ 34 ] Minano J , Gonzalez J , Zanesco I. Flat High Concentration Devices. In : Proceedings of the First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Hawaii USA , 5—9 December 1994. 1123—1126

[ 35 ] Luque A. Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentration , Photovoltaic Concentration. England : IOP Publishing Ltd. , 1989. 313—317

[ 36 ] W. T. 威尔福德 , R. 维恩斯顿 著 , 王国强译. 非成像聚光器光学. 北京 : 科学出版社 , 1987. 50—51 [ Welford W T , Winston R. Trans Wang G Q. The Optics of Non-imaging Concentrators. Beijing : Science Press , 1987. 50—51 ( in Chinese ) ]

[ 37 ] Antonio L , Steven H. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. In : Swanson R M ed. Photovoltaic Concentrators. West Sussex , England : John Wiley & Sons Ltd , 2003. 449—452

[ 38 ] <http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=196602149>



· 物理新闻和动态 ·

## 上海交通大学纪念中国首位物理学博士毕业 100 周年

上海交通大学和德国波恩大学于 2007 年 10 月 10 日在上海交通大学闵行校区隆重集会 , 纪念中国首位物理学博士李复几毕业 100 周年. 上海交通大学校长张杰院士与波恩大学校长 Matthias Winiger 教授出席纪念会并致辞. 波恩大学向上海交通大学赠送李复几博士学位论文的副本和博士学位证书的副本.

李复几是我国物理学界公认的中国第一位物理学博士. 1899 年至 1901 年 , 他在南洋公学( 上海交通大学的前身 ) 中院学习 , 为南洋公学中院首届毕业生. 1901 年 8 月 , 南洋公学选派他与胡振平、赵兴昌、曾宗鉴共 4 名中院毕业生留学欧洲. 李复几先留学英国 , 后留学德国 , 1907 年获得德国波恩大学物理学博士学位. 其博士论文完成于 1907 年 1 月 , 题目是“ 关于勒纳德碱金属光谱理论的分光镜实验研究 ” , 主要内容是通过拍摄钠的火焰光谱图来验证 P· 勒纳德( Lenard ) 提出的火焰中心发射说.

19 世纪末 20 世纪初 , 光谱实验及其数学表达式成为物理学家的热门课题. 德国著名物理学家勒纳德( 于 1905 年因阴极射线的实验研究而获得诺贝尔物理学奖 ) 于 1903 和 1905 年提出火焰发射说 : 发射谱线的光弧是由大量的相互包裹着的中空火焰组成的 , 每层次火焰都是一个发射中心 , 每个中心发射一个线系 , 且主线系的火焰中空形状最大 , 第一、第二副线系的中空形状逐渐缩小. 为了验证勒纳德的理论 , 李复几在其导师凯瑟尔指导下 , 在波恩大学物理研究所作了实验研究. 他将钠放入两根碳棒电弧

之中 , 用摄谱仪拍下火焰照片. 然而即使以高倍放大镜在毛玻璃上观察 , 他也没有看到中空火焰的形状 , 甚至连一丝痕迹也都不存在. 李复几又进一步通过加大光圈或延长曝光时间的方法 , 通过反复实验发现 : “ 加大一倍光圈 , 第一副线系谱线的图像就和正常光圈时主线系一样大 ; 再加大光圈 , 第一副线系的图像还可以大于最小光圈时主线系的图像. ” 因此 , 李复几得出结论 : 火焰图像大小实际上是与其强度相关的. 李复几在论文中断言 : 我相信 , 这足以证明勒纳德关于光弧由大量相互包裹的中空火焰组成 , 每一个都是一个发射中心 , 每个中心发射一个线系的假说是不正确的. 同时也分析了勒纳德假说产生错误的原因.

上世纪 20 年代以前 , 物理学在中国尚处于萌芽阶段 , 留学生大多选读法政、工程技术等学科 , 研究数学、物理等自然科学的学生为数极少 , 获得学位的学生更是微乎其微. 据统计 , 1900 年至 1920 年期间 , 我国获得物理学博士的只有 3 位 , 除李复几外 , 还有 1914 年获得美国芝加哥大学博士学位的李耀邦( 1884—1940 ) , 1918 年获得哈佛大学博士学位的胡刚复( 1892—1966 ). 其中李复几和胡刚复回国后都先后在交通大学任教. 他们开了研习物理风气之先河 , 一定程度上影响了后来者 , 成为中国近代物理学发展史的“ 起点 ” 人物. 因此 , 吴大猷将他们列入中国的“ 第一代的物理学家 ” , 并给予较高评价.

( 上海交通大学物理系 郑杭 )