

文章编号: 0258-7025(2009)01-0005-10

太阳能发电技术的研究进展

方祖捷 陈高庭 叶 青 瞿荣辉

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 太阳能被认为是人类在 21 世纪将取代传统化石能源的最佳选择之一,它是一种可以再生的绿色能源。基于近年来所阅读的文献资料,较为系统地介绍了太阳能发电技术(PV)发展的状况,包括太阳能电池及相关的光学技术;并简单介绍世界和我国太阳能产业发展状况和趋势。从国际上的技术进展看,今后 10 余年将是太阳能发电技术和产业大发展的时期。预计 2020 年前后,太阳能发电将在经济上胜过传统技术而成为电网的主力;在技术上,基于 III-V 族化合物半导体的多重结高效率太阳能电池,配合大聚焦比光学系统的聚焦型太阳能发电(CPV),是最有发展前途的方向之一。

关键词 太阳能电池;光伏发电;聚焦光学系统

中图分类号 TM615 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0005

Progress of Photovoltaic Electric Power Generation

Fang Zujie Chen Gaoting Ye Qing Qu Ronghui

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Solar energy is widely considered as the best choice to replace the traditional fossil energy in 21st century, as one of the renewable “green” energy sources. Recent progresses of photovoltaic (PV) electric power generation, including solar cells, related optics, and industrial trends in the world and China, are reviewed briefly. Viewing the technology progress of the world, it may be concluded that the coming ten and more years will be an important period for both PV technology and industry. It is expected that PV power will become main force of the power grid by 2020, superior to the traditional technologies. It is recognized that the technology of high efficiency multiple junction solar cells based on III-V compound semiconductors, coordinated with high concentration optics concentrating photovoltaics (CPV), is one of the major directions.

Key words solar cells; photovoltaic power generation; concentration optics

1 引言

能源危机是当前世界各国最关心的焦点之一。传统的化石能源支撑了人类至今的工业化。但是,这是一种有限的资源。据《BP 世界能源统计 2007》估计^[1],按照目前的使用状况,全球石油还可开采 42 年;天然气还可开采 63 年;煤炭还可开采 295 年。另一方面,化石能源的使用带来了环境的恶化。《京都议定书》为此制定了限制温室气体排放的时间表。人类社会和经济生活的持续发展,在要求节约能源的同时,急需开发新能源,尤其是可再生的绿色能源,其中太阳能的直接利用被认为是最佳的选择之一。目前,太阳能的利用有许多途径,直接的如太

阳能热水器、太阳能电池等;间接的可以包括风力发电、水力发电、生物能等。这是科技工作者应当做出贡献的领域,也是值得产业界和经济界关注的领域。本文基于近年来所阅读的资料和对太阳能发电技术的关注,介绍太阳能发电技术(PV)发展的状况,包括太阳能电池及相关的光学系统技术;并简单介绍世界和我国太阳能产业发展状况和趋势。

2 太阳能电池

据估计,地球表面太阳能的密度达到 1000 W/m^2 。假设太阳能电池的利用效率为 10%,以平均每天辐照时间 6 h 计算,一个面积为 100 m^2 的

收稿日期:2008-08-08;收到修改稿日期:2008-10-09

作者简介:方祖捷(1942—),男,研究员,博士生导师,主要从事半导体激光和光电子器件领域的研究。

E-mail: zjfang@siom.ac.cn

屋顶可获得60度的电力,每月达1800度,这是十分可观的能源。要用光伏效应技术利用太阳能,首先需要了解它的光谱分布。图1显示太阳辐照功率谱密度($\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$)的光谱分布图^[2]。大气层外的辐照能量密度为 $1366 \text{ W}/\text{m}^2$ (Air Mass; AM=0)。由于在地球海平面上的光谱中出现了水和氧气等的吸收峰,辐照密度降到 $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ 。文献报道,

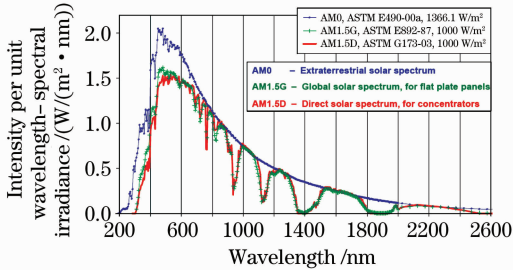


图1 太阳辐照密度的光谱分布

Fig. 1 Standard solar spectra

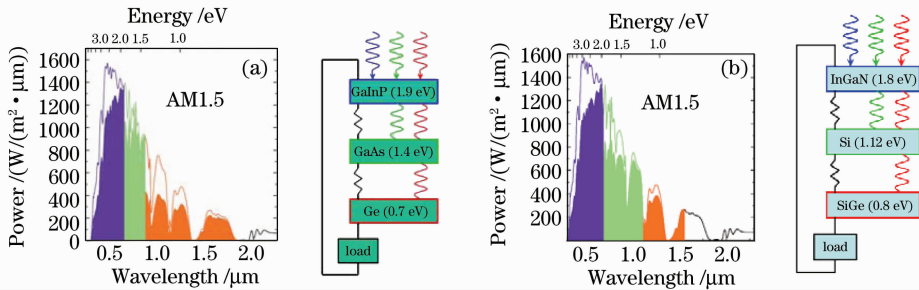


图2 两种三重结太阳能电池结构和对应的光谱

Fig. 2 Structures and corresponding spectra of two triple junction solar cells

为了实现多结串联的太阳能电池,通常需要解决一系列的科学技术问题:

第一,不同材料之间的晶格不同。在多结材料生长制备中,必须在不同晶体之间添加缓冲层,否则难以实现后续晶体的单晶生长。虽然多晶和无定型材料也有光伏效应,但是与单晶材料相比,效率要低得多。一般采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)生长多重结材料。这就要求生长设备有多种材料源,包括基质材料成分和各种掺杂源。还需要精密的配比控制和生长速率控制。

第二,在串联的P-N结之间,是一个反向的N-P结,这对于产生的光电流是一个需要克服的势垒。为此要在N-P结处做高浓度的掺杂,利用隧道效应克服势垒。

第三,P-N结上的光电转换过程,涉及光子的带间吸收和光生载流子的输运过程。光子吸收效率决定于吸收系数和光程两个因素;载流子的输运涉及P-N结内建电场的空间分布。对于直接带隙材

料,还需要考虑光生载流子的复合发光的影响。因此必须对于各层材料的配比、厚度、掺杂浓度等基本参数做仔细的综合性的优化设计。

料,还需要考虑光生载流子的复合发光的影响。因此必须对于各层材料的配比、厚度、掺杂浓度等基本参数做仔细的综合性的优化设计。第四,不同材料之间折射率不同。光波在不同介质界面上将发生菲涅耳反射。尤其是在最外面一层半导体材料与空气界面上,必须采取措施减轻菲涅耳反射的影响。此外,还需考虑宽波段的要求、材料色散和宽光谱的减反介质膜技术。第五,高纯度的材料。材料中某些杂质、缺陷和界面态起着光生载流子复合中心的作用,它们会大大降低光电转换的效率。要对晶格失配缺陷对光电性能的影响做深入的研究。图3(a)是一个由Ge, GaAs和GaInP三种半导体材料构成的三重结太阳能电池的结构示意图^[2]。该结构用P型Ge为衬底材料,Ge的P-N结作为低能端的光电转换。在Ge上采用GaInAs作为缓冲层,通过组分配比的逐步变化,过渡到近红外或长波长可见光波段的GaAs或GaInAs的P-N结。最后

太阳辐照接近于一个温度为5762 K的黑体,其峰值在500 nm波段。半导体光伏效应的光谱响应决定于它的禁带宽度。低于禁带宽度的光子不能使电子从价带跃迁到导带;高于禁带的光子会激发载流子的带间跃迁,但是其高于禁带宽度部分的能量最终以热量的方式耗散,不能充分利用。最常用的硅材料,禁带宽度为1.1 eV,因此硅太阳能电池光电转换效率最高的波段就位于近红外波段。对太阳能光谱峰值附近的光子,硅太阳能电池的转换效率比较低。为了提高太阳能的转换效率,必须利用包括禁带宽度相当于可见光波段和红外波段的若干种半导体材料,以尽可能地与太阳能光谱相匹配。目前,国际上已经研制成功基于III-V族化合物半导体的二至三个P-N结串联的太阳能电池,并正在继续研究探索更多结的技术。图2显示两种三重结的结构和原理的示意图^[2]。

通过 AlGaInP 过渡,生长 GaInP 材料的 P-N 结。三结相互之间有高掺杂的 N^{++} - P^{++} 隧道结相连。在每一隧道结上面生长了一层 BSF (Back Surface Field),以减少光生载流子在界面上的损失。顶层生长了 AlInP 窗口层和减反射介质膜 (AR)。研究和设计更多重结电池的报道也不少。图 3(b) 是一种硅基的四结太阳能电池的示意图^[2]。

由此可见,多结材料的生长涉及十分高的技术要求 and 难度,必须采用精密、复杂的半导体材料生长设备;并且要利用和发展新型工艺技术,如芯片直接键合技术 (Wafer Fusion)。另一方面,从原材料来源角度,Ga,As 和 Ge 在地壳中的含量远远低于硅。硅元素在地壳中的原子数分数为 16%,而 Ga,As

和 Ge 在地壳中的原子数分数都低于 10^{-5} %。因此 III-V 族太阳能电池的成本要比硅太阳能电池高得多。从长远可持续发展的角度,这是应当考虑的问题。如果用同样面积的光电池去接收太阳的辐照,III-V 族太阳能电池的发电成本就会高得多。但是与硅相比,III-V 族半导体可以在高的温度下工作,容许在更高密度的辐照下完成光电转换。因此,利用聚焦光学系统将太阳辐照会聚成很小的面积,就可以大大减小电池的面积。如果按照面积计算的光学系统的成本低于硅光电池的成本,III-V 族太阳能电池就可以获得更低的发电成本。

美国 Spectrolab 公司首先研发了三重结太阳能电池,并保持了最高转换效率的记录。Emcore 公司

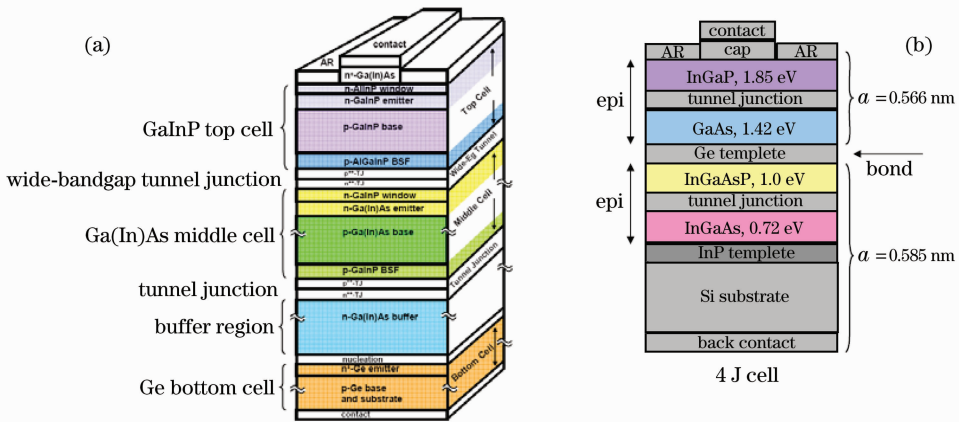


图 3 (a) Ge/GaAs/GaInP 三结太阳能电池和(b) Si 基四结电池的结构

Fig. 3 (a) GaInP/GaAs/Ge triple junction solar cell and (b) Si four junction solar cell

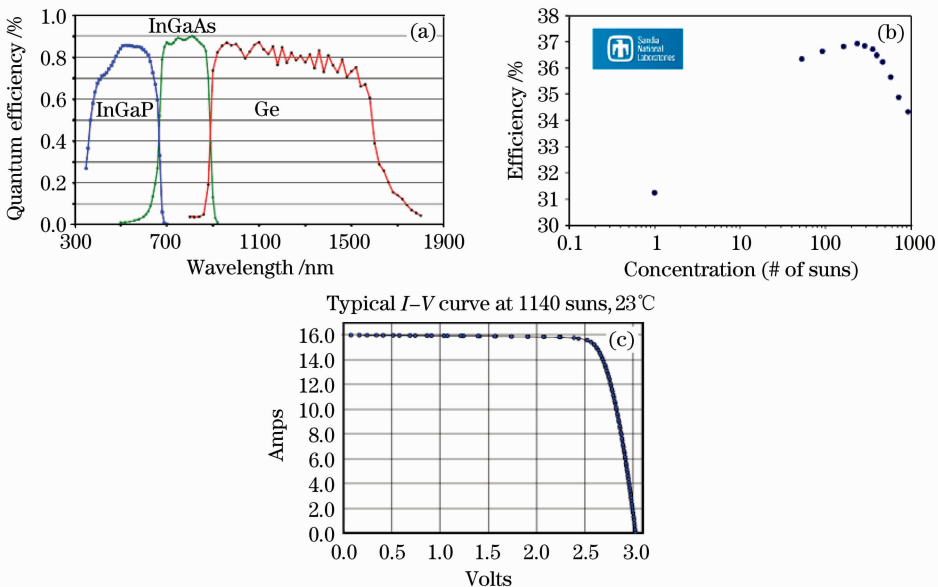


图 4 Emcore 公司三重结太阳能电池的(a)量子效率、(b)转换效率和(c)I-V 特性

Fig. 4 Quantum efficiency (a), efficiency versus concentration (b) and I-V curve (c) of triple junction solar cell from EMCORE Corporation

2006 年推出的三重结太阳能电池^[3],有效面积 108 mm²,厚度 0.16 mm。图 4(a)显示了三重结各自的量子效率光谱曲线;(b)为不同聚焦比(Concentration)下的效率。在 200 余倍聚焦比下能量转换效率达到 37%。在 1140 倍聚焦下的伏安特性如图 4(c)所示,在 2.5 V 电压下可提供 16 A 的光电流,输出功率 40 W。

根据太阳能光谱和光伏效应的基本原理,可以从理论上分析转换效率与结数量之间的关系,以把握多重结太阳能电池的研发方向。理论分析结果表明^[4],四重结光电池在足够高的聚焦比下,转换效率的理论目标可达 63%,如图 5(a)所示。图 5(b)显示了另外一个报道的理论分析结果,并标出了实验数据作为对照。

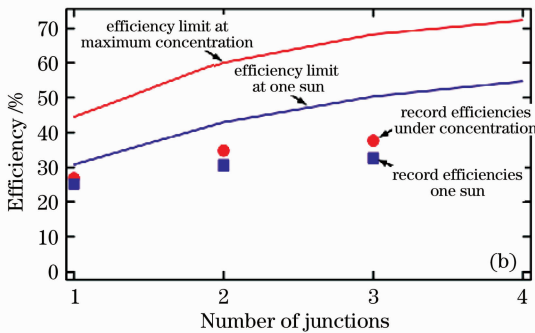
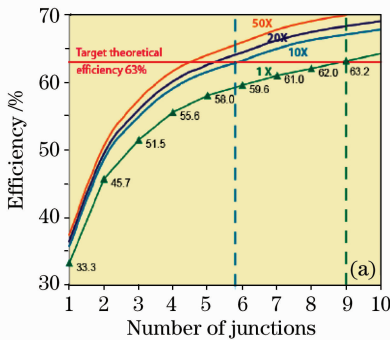


图 5 效率随结数量变化的关系。(a) 理论计算;
(b) 理论和实验对照

Fig. 5 Relation of efficiency and junction number. (a) theoretical result; (b) comparison of theory and experiment

当然,聚焦光学系统也可以用于硅太阳能电池,以提高辐照密度,减小硅片的面积。但是对于硅,聚焦比不能太高。辐照密度提高对转换效率的作用,对于工作温度较低的硅器件会较早地趋于饱和,并随之下降。据报道用于硅太阳能电池的聚焦比一般为 30~50 倍;而用于 III-V 族太阳能电池的聚焦比一般为 500~1000 倍。聚焦型太阳能电池成为近几年来研究开发的热点。

硅太阳能电池发展最早。虽然技术上最成熟,但是仍然有不少研究和开发工作,一方面希望进一步提高转换效率,另一方面希望进一步降低成本。一个思路是在几何结构上想办法。图 6 是一种细条型结构(Sliver)硅太阳能电池^[5]。该结构的基本思想是将二维平面型的受光面变为三维的立体型受光面。一个硅片上可以制作几千个细条。据报道,该结构在同样尺寸下可以将受光面积增大 10~30 倍。图 7 是另外一种方案,将材料制备成双面的太阳能电池^[6]。该结构在接收直射太阳光的同时,还接收从地面反射和散射的太阳光。

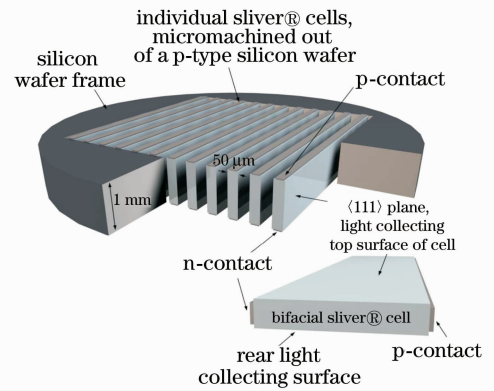


图 6 Sliver 结构硅太阳能电池

Fig. 6 Silver structure Si solar cell

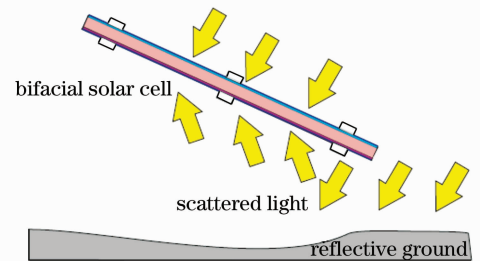


图 7 双面太阳能电池

Fig. 7 Bifacial solar cell

另外一种受到广泛重视的方案是薄膜型电池。其中的光电转换材料可以采用无定型硅、多晶硅或微晶硅。有一些研究工作以开发 IV-VI 族半导体材料为目标,用 CdTe 作为有源区,配合 CdS, ZnO 等材料构成异质结。另外一种受到广泛关注的材料是铜-镉-硒合金(CIS: Copper-Indium-Selenium),铜-镉-镓-硒合金(CIGS),或 Cu₂ZnSn₄。这些材料都可以用薄膜制备方法,如射频溅射、真空蒸发等,沉积在玻璃基板,甚至柔软的基板上。铜-镉-硒材料资源相对来说很丰富,制备也比较简易。虽然转换效率低于单晶硅,但是相差也不是很多。据报道^[7],CuInGaSe 电池的转换效率已经达到 19.2%,离开单

晶硅电池24.7%的记录不太远,而成本要低得多,从大面积推广应用考虑,很值得重视。此外还有许多新型材料在研究、开发和探索之中,其中包括有机聚合物材料和染料敏化的聚合物。它们的转换效率远低于硅和Ⅲ-V族材料,但是其成本也远远低于半导体材料。而且可以制备柔软底板的大面积电池,适合于在各种不同形状的建筑物上铺设。在Ⅲ-V族材料方面,氮化物半导体高温性能优异,不同配比组合可获得很宽的禁带宽度调节范围。图2(b)显示的就是以Ge-Si合金,Si和InGaN三种材料构成的三重结电池。虽然红外长波边的能量稍有损失,但属于太阳能光谱中能量较弱的边缘区域,影响较小。

图8是被许多文献引用的各种太阳能电池转换效率30年来发展的汇总^[2,8]。可以看到,从效率的角度,最高为多重结Ⅲ-V族材料,下面依次为单晶硅、薄膜技术和有机聚合物。文献^[8]报道,2006年光电池转换效率的世界记录是锗基三重结的40.7%;2007年报道为42%;预期2009年将达到45%。

光电池材料是太阳能发电的基础。科学和技术的发展没有止境,新概念的光伏电池材料和结构

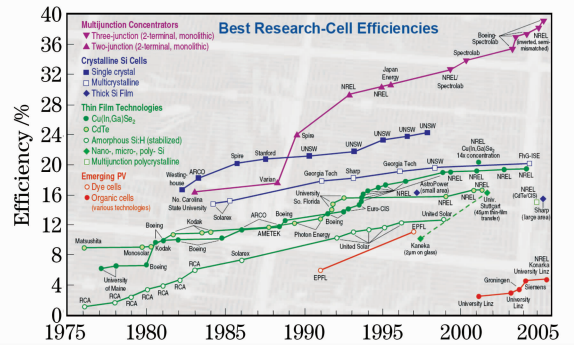


图8 几种主要的太阳能电池转换效率的发展进程
Fig. 8 Efficiency improvement progress of several main solar cells

也在不断探索之中。图9(a)是一个新概念的光电池^[9]。在宽带材料中引入中间能带,太阳能的长波光光子将电子激发到中间能带,随后又被长波段光子激发到导带中;短波光光子将电子直接从价带激发到导带上去。这样就扩大了光电池的光谱响应范围。另一个新概念是对短波长光子用频率下转换方法,一个高能光子变为两个低能光子,再用窄禁带的半导体材料作光电转换,如图9(b)所示。

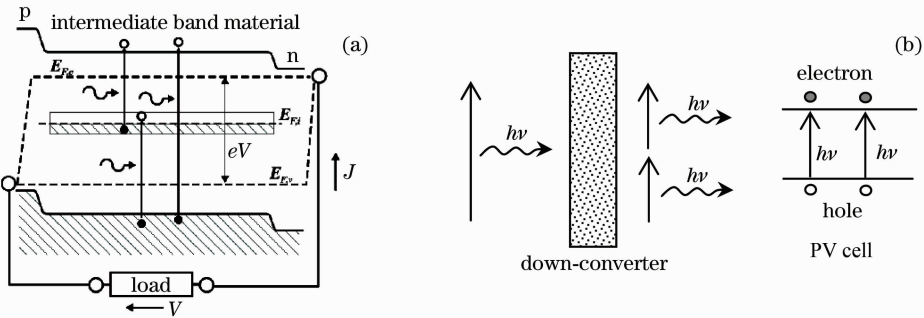


图9 (a) 利用中间带概念的光电池;(b) 利用频率下转换概念的光电池

Fig. 9 New concept solar cells: (a) by using intermediate-band material and (b) by frequency down-conversion

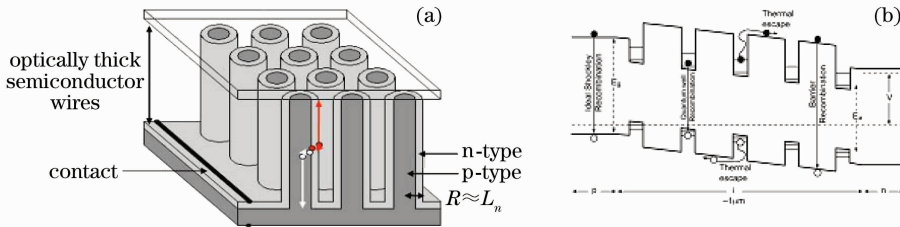


图10 (a) 纳米线太阳能电池的概念;(b) 级联量子阱太阳能电池的概念

Fig. 10 New concept solar cells. (a) by nano-wire structure, and (b) by cascaded quantum well

此外,纳米材料在太阳能电池方面的应用也在探索之中。图10(a)是纳米线太阳能电池的一个方案^[2]。图中圆柱体表面为n型半导体,芯子为p型。无数纳米线构成表面积巨大的光电池,充分吸收太阳光。文献报道,在硅衬底的纳米金球阵列上可以

生长直径数十纳米,长度达数微米的硅纳米线。还有报道用ZnO制备的Nano fibrils材料。图10(b)是一种级联量子阱结构的概念设计^[10]。该结构中,有小带隙阱中的子能级对,还有大带隙垒的带间能级,包含了多种不同能量差的能级,具有宽的吸收谱。

随着能源技术和产业浪潮的高涨,无论在物理上还是在技术上,太阳能电池将会取得目前想象不到的大突破和大发展。

3 聚焦型太阳能发电装置

聚焦型太阳能电池(CPV)技术,被认为是一个具有最佳经济和技术发展潜力的方案。聚焦型太阳能发电装置,涉及光学系统和阳光跟踪装置两个方面。常用光学仪器往往从成像的质量、聚焦光斑的尺度、准直光束的平行度等因素考虑,而聚焦型太阳能电池的技术要求,主要考虑是能量的会聚效率。从实际应用考虑,这种光学系统和跟踪装置应当具有以下基本性能要求:

1) 高的聚焦比。据分析,要获得好的技术性能和经济效益,这一比值应当达到 500~1000 倍。就是说,假如 III-V 族光电池的大小为 1 mm^2 , 聚焦光学系统的孔径应当达到 25~37 mm。

2) 与太阳能光谱相匹配的宽光谱范围的高透过率,以获得最佳的能量利用效率。

3) 适应野外使用,其中包括光电池的热沉设计。自古至今,聚焦太阳光就被用于点火,甚至被用作武器。在强聚焦光下电池的温升,直接影响转换效率和器件寿命。太阳能的一大半将转化为热,在电池及其装置上耗散,因此散热方法极为重要。

4) 具有长的工作寿命和低成本。从装置的建设到日常运转的费用,折合到发电的价格,能否与现有火电和水电价格竞争,这是新能源技术成功的最终判决。

太阳光聚焦的光学系统,一般都采用多次会聚的设计。用于太阳能发电系统的光学系统必须有很大的通光孔径。如果用常规光学系统的玻璃透镜,体积、重量、材料和加工费用均难以承担。因此,第一级的聚光系统基本上采用两种方案,一是用二元光学的菲涅耳透镜,二是采用凹型抛物面反射镜。图 11(a)是一个大型凹面聚焦系统的照片^[11]。这种大型凹面镜可以采用许多平面反射镜组装而成,以降低加工难度和整体成本。

太阳能电池芯片可以安装在反射镜的焦点处。但是这样布排不便于电池的散热。因此,一般大型凹面聚光镜要配合第二次、第三次聚光装置,并包括热沉的设计安排。图 11(a)中的光电池实际上也是安装在凹面镜的中心底部。抛物面反射镜的焦点部位安装一个双曲面反射镜,构成卡塞格伦望远镜系统。图 11(b)是包含芯片热沉的一个设计例子示意

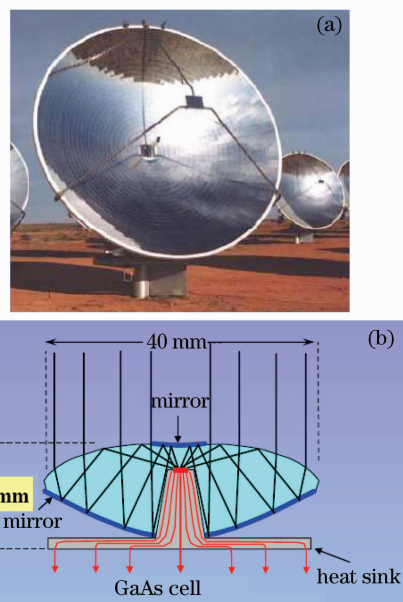


图 11 (a) 大型卡塞格伦系统照片; (b) 一个包括热沉的设计方案

Fig. 11 (a) Cassegrain system; (b) a scheme including heat sink

图^[11]。该设计将光电池安放在靠近二次反射镜处,以减小二次反射镜挡光的比例。电池的热沉伸展到底部的大型散热板上。图 12(a)是一个用粗光纤或万花筒圆柱作为导光管的设计^[12]。光电池安装在底部以便于散热。图 12(b)是用一个角锥做第三次聚光的方案^[13]。在反射镜会聚系统中,由于二次反射镜的挡光,聚焦光斑往往为环状,中心呈现暗斑。光纤和角锥还起着使聚焦光斑能量分布均匀化的作用。在相同总功率下,均匀辐照与不均匀辐照相比,光伏电池可以获得更高的转换效率。

从图 11(b)所显示的尺寸可见,设计的光纤系统的孔径为 40 mm,厚度仅为 15 mm。这一装置的加工和安装费用远远低于大型凹面反射镜装置。而且,降低光学机械系统的高度,有利于降低成本,便于安装维护。在聚光比相同的情况下,小型聚光器配合小面积电池芯片,整个发电系统采用多单元方式集成,可以更充分、更有效地利用太阳能,如图 13(a)和(b)所示^[11]。而且,小型系统不仅有利于装置的稳定性,而且会降低跟踪瞄准机械结构的要求。光学和机械系统要统筹考虑,适应系统动态运转的要求,优化设计。

采用二元光学原理的菲涅耳透镜,可以在一个薄板内制作会聚透镜,而且可以采用透明塑料制作,成本十分低廉,应用很广。图 14(a)是一种二次透射聚光的设计,第一级用菲涅耳透镜,第二级用浸没

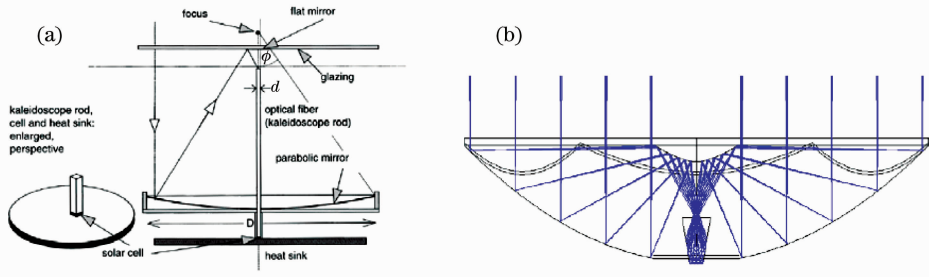


图 12 (a) 光纤导光的二次反射结构; (b) 角锥导光结构

Fig. 12 Two-reflection structure of photovoltaic concentrator with optical fiber kaleidoscope (a) and with cone collector (b)

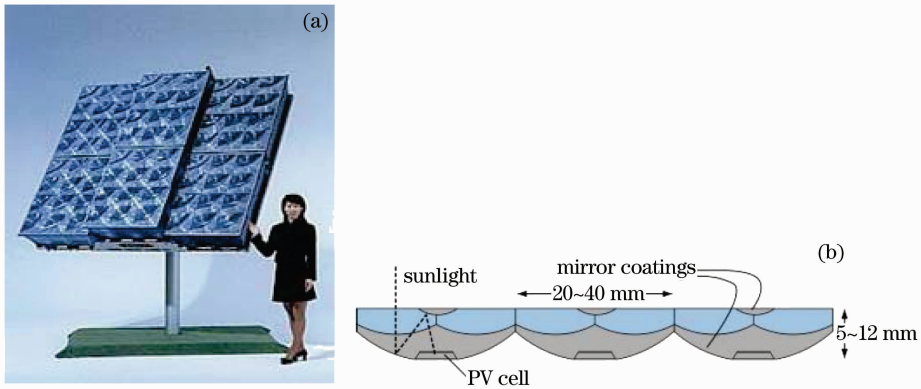


图 13 集成型聚焦太阳能电池装置的照片(a)及其结构设计(b)

Fig. 13 (a) Photograph of concentration solar cell; (b) design of integration

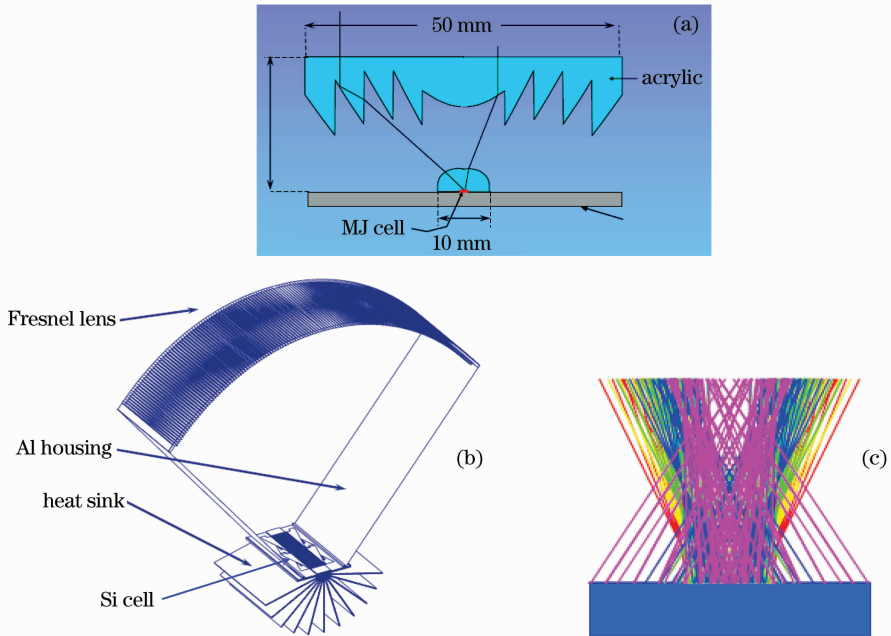


图 14 菲涅耳透镜的两种设计(a), (b)和(c)折射元件的色差问题

Fig. 14 (a), (b) Two designs of Fresnel lens; (c) chromatic aberration of refractive element

式塑料透镜^[11]。图 14(b)是圆柱形会聚的菲涅耳透镜^[14],底部显示了散热用的铝板。该结构聚焦比较低,适用于大规模硅太阳电池。与不存在色散的反

射光学元件不同,菲涅耳透镜是利用材料折射的光学元件,存在色散问题。图 14(c)显示了不同颜色的光路,反映了聚焦的色差。这也是系统设计时应

当考虑的问题。

为了充分利用太阳能全部光谱范围的能量,要研究宽波段的介质减反射膜。这也是一个有挑战性的课题。另外一种考虑是采用双色膜,将不同光谱波段分开来。图 15(a)用一个分束片将两个波段的光波分开,分别用两种接收器做光电转换^[11]。图 15(b)的方案^[15]是将可见光能量经卡塞格伦系统会聚,并采用一个导光圆柱体将能量传输到二重结的 III-V 族光电池上。系统中的双曲面二次反射镜蒸镀反射可见、透射红外的双色膜,用窄禁带的 GaSb 电池接收透射的红外波段能量。

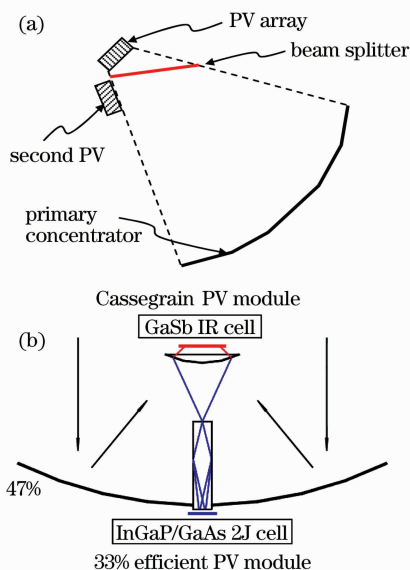


图 15 利用双色分束板的两种装置

Fig. 15 Two designs by using dichromatic beam splitter

太阳能电池产生的电能的利用,同回路中的负载有关。这与通常电路中阻抗匹配的要求类似。光电池的伏安特性如图 16 所示^[2]。在一定的辐照强度下,从电池获得的功率决定于电流和电压的乘积,可见有一个可获得最大的输出功率的最佳工作点。在该工作点上,器件上的发热也最低。为此,需要在整体电路中做阻抗匹配的优化设计和控制。其次,在大规模产业化的太阳能应用中,电池产生的电能要进入电网。这就要有一个升压、稳压、蓄电和交直流变换的电路系统。单个光电池的输出电压很低,多个串联可以提高输出电压。从经济管理的角度,还必须配备能够双向计量电能的电表。阳光充沛时向电网输电,夜晚和阳光不足时从电网取得电能。

聚焦型太阳能电池必须配备对太阳光的跟踪瞄准系统。每天要跟踪太阳上山、下山过程;不同季节要跟踪太阳轨道平面倾角的变化。好在人们已经充分掌握了太阳和地球转动的规律性,可以存储在电

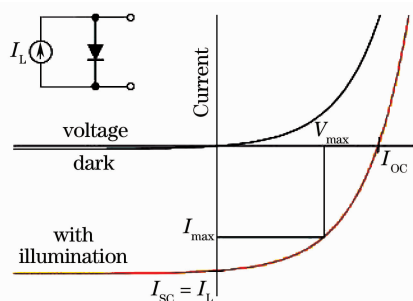


图 16 光伏电池的伏安特性

Fig. 16 I - V characteristic of PV cell

脑数据库中。但是,高倍率聚焦系统要求高的跟踪精度,一旦有所偏离时,能量的损失将会很大。这就需要采用光电自动跟踪瞄准机构。与空间应用的光电系统相比,技术上应当不会有大的困难,但是跟踪系统的成本和长期使用的可靠性是应当考虑的问题。

4 产业发展趋势和讨论

据估计^[2],全球可再生能源中,水电为 0.9 TW,风能为 2 TW,生物能(Biomass)为 5~7 TW,而太阳能为 50~1500 TW。可见太阳能利用的巨大潜力。太阳能的利用有多种途径。太阳能直接加热的应用,已经进入千家万户。太阳光通过光导纤维为大型建筑提供照明,已经开始成为低能耗绿色建筑有吸引力的方案。太阳能电池为航天器提供能源,技术含量更高。限于民用太阳能电池发电的相关技术,本节拟再补充提供一些产业发展状况。

太阳能电池发电的前景是肯定的。但是作为新型能源,它处于什么阶段、什么地位,还决定于经济效益的估计。光伏电能的综合成本目前还是比较高,估计为 \$5.42/W_p;而目标要降到 \$1.00/W_p 以下^[2]。这里的 W_p 是指午间理想阳光条件下的功率。要降低 PV 电能价格,必须首先降低太阳能电池组件的价格。图 17 显示组件(模板)成本和年产量在 2000 年以来的发展,和未来 10 余年的预测^[16]。可以看到,价格随着产量增大而下降,到 2020 年组件成本可降到 \$0.9/W,而产量将达 55 GW。图 18 为^[15]计算和预测的太阳能电价。他们设定的目标电价为每度(kW-h)7 美分。而目前的太阳能电价为 28 美分。通过改善阳光跟踪技术,可以降低到 1/1.4;通过降低光学系统成本,可再降一半;而通过提高太阳能电池的效率,可以降低到 1/1.5。总计降低 4.2 倍,到低于每度 7 美分。图 18 显示了聚焦型多重结和平板单晶硅两种太阳能电池的经济预测。可见 2007~2008 年间两者基本相等,

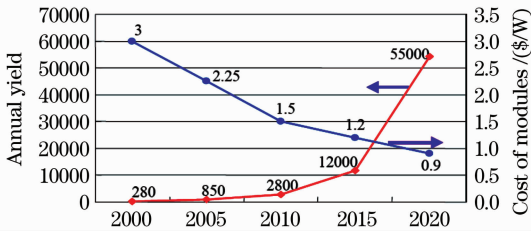


图 17 光伏组件 Module 的产量和价格的变化与预测
Fig. 17 Evolution of annual yield and cost of PV module

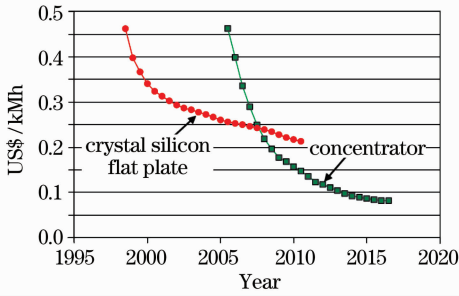


图 18 太阳能发电的经济预测
Fig. 18 Economic evolution of solar electricity

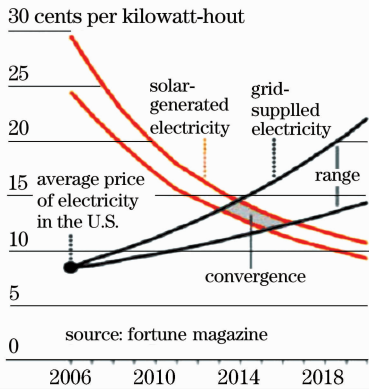


图 19 美国电价的预测

Fig. 19 Price prediction of US electricity

再往后,前者将越来越占优势。

图 19 给出一个对 PV 电价和美国电网电价在 2006~2020 年间的变化的估计^[13]。2006 年美国常规电价为每度 8 美分,而 PV 电价在每度 25~30 美分范围。估计到 2013~2016 年期间,PV 电价可降低到 15 美分以下,与上涨后的电网电价相当。到 2020 年 PV 电价将降到 10 美分,而常规电网价格将涨到 15~20 美分。这时,太阳能发电与常规电能相比,就具有很大的优势了。因此,太阳能发电受到美国、日本和欧洲各国的极大重视。图 20 是世界各国和各地区 1988~2003 年间太阳能发电量的统计^[17]。可以看到近十年来以指数增长的态势发展。欧洲若干年前就制定了计划,动员欧盟各国科学家和产业界共同研发 PV 技术^[18]。日本在政府优惠

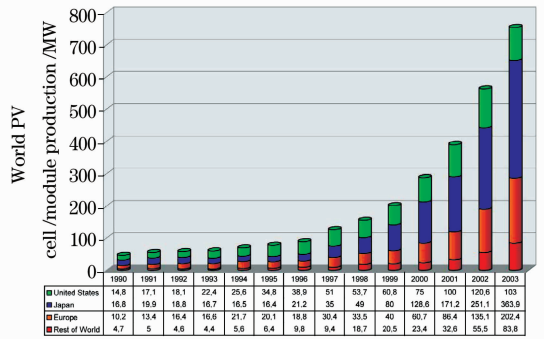


图 20 世界各国和各地区太阳能发电量的统计

Fig. 20 World PV cell/module production in 1990~2003 (data source: PV News)

政策的鼓励下,PV 产业在国际上处于领先地位。

2008 年北美太阳能会议《Intersolar North America Conference》上统计,最近 1~2 年成立新公司 120 家,其中 55%在美国。PV 市场规模估计为 200 亿美元,并以每年 40%的速率增长。2008 年德国装备了 1500 MW 新的发电设备,为世界领先。美国紧随其后,计划到 2012 年的安装容量为 1800 MW。图 21 为一个太阳能发电厂的外貌,可以看到 PV 产业的发展规模。



图 21 一个典型的太阳能发电厂的外貌照片

Fig. 21 Photograph of a typical solar power station

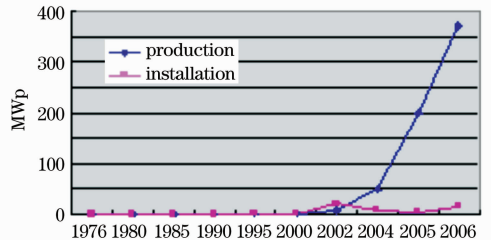


图 22 我国历年来生产量和在国内安装的 PV 发电量的统计

Fig. 22 Statistics of production and installation of PV in China from 1976 to 2006

太阳能发电在我国也已经受到了一定的重视,但是技术和产业的发展水平远远低于国际发达国家。图 22 是我国历年来生产量和在国内安装的

PV 发电量的统计。2006 年我国生产量为 369.5 MW_p, 在世界总生产量 (~1 GW_p) 中占有相当大的比例。但是大部分为出口, 国内年安装量只有 15 MW_p, 2006 年累计装机容量仅为 85 MW_p。据 2008 年国际太阳能光伏大会暨(上海)展览会的报道^[19], 2007 年世界太阳能电池产量为 4000 MW_p, 中国产量达 1088 MW_p。居领先地位。但是 2007 年国内安装量仅为 20 MW_p, 累计为 200 MW_p。与全球总量相比, 比例很低。而且, 据报道, 不少大型 PV 工程还是由国外公司在我国建造的。我国是一个能源消耗大国, 可再生能源的开发迫在眉睫。太阳能发电的技术和产业, 我们要急起直追。从本文调研的资料可以看到, 一是要充分重视基于 III-V 族化合物半导体的多重结太阳能电池的研究和开发; 二是要充分重视聚焦型太阳能发电设备的研究、开发和工程化应用。

太阳能发电的报道和资料十分丰富。从本文调研的资料可以看到: 1) 太阳能电池的研究发展, 是太阳能发电的基础。基于 III-V 族化合物半导体的多重结太阳能电池, 是近几年的研究和开发的热点, 值得引起重视。2) 要充分重视利用光学聚焦系统提高太阳能转换效率技术的研究、开发。这一技术也是提高总体经济效益的有效途径。3) 应用需求是技术发展的基本推动力。要重视太阳能发电设备的研究、开发和工程化应用, 其中包含相关的检测和标准化技术、电力基础设施的建设, 也需要政策上的研究和支 持。当然, 作者们没有直接从事过相关的研究和 技术工作, 与太阳能发电领域丰富的原始文献相比, 本文仅仅是对近年来该领域研究进展的一个概括, 希望能够为感兴趣的读者和同行们提供一些帮助。

致谢 本文得到了中国科学院上海光学精密机械研究所名誉研究员李天培先生的指导和鼓励, 得到了刘斌先生的帮助, 他们对本文提出了许多宝贵的意见, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 [http://www.bp.com/modularhome.do? categoryId=4720&contentId=7010577](http://www.bp.com/modularhome.do?categoryId=4720&contentId=7010577)www.bp.com/statisticalreview
- 2 Harry Atwater. Photovoltaics: Meeting the Terawatt Challenge

- [C]. ENIC 6/24/06, <http://web.mit.edu/nanoengineering/ENIC06/ENIC2006PVTutorialHAA.pdf>
- 3 EMCORE T1000 Cell-Triple-Junction High-Efficiency Solar Cells for Terrestrial Concentrated Photovoltaic Applications [R]. <http://www.emcore.com/assets/photovoltaics/T1000%20Data%20Sheet%20March%202007.pdf>
- 4 A. Barnett, C. Honsberg, D. Kirkpatrick *et al.*. 50% Efficient Solar Cell Architectures and Designs, Photovoltaic Energy Conversion [C]. Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on, 2006, 2, 2560~2564
- 5 Andrew Blakers, Klaus Weber, Vernie Everett. Sliver solar cell technology [R]. http://solar.anu.edu.au/docs/0603_Sliver_technology.pdf
- 6 T. Buck, R. Kopecek, J. Libal *et al.*. Industrial screen printed n-type silicon solar cells with front boron emitter and efficiencies exceeding 17% [R]. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2006/rx06050.pdf>
- 7 K. Ramanathan, M. A. Contreras, C. L. Perkins *et al.*. Properties of 19.2% efficiency ZnO/CdS/ CuInGaSe₂ thin film solar cells [J]. *Prog. Photovolt*, 2003, **11**(4):225~230
- 8 Sarah Kurtz. Concentrating solar power forum concentrating photovoltaics [R]. May 6, 2008, <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43331.pdf>
- 9 A. Mart, E. Antol, C. R. Stanley *et al.*. Production of photocurrent due to intermediate-to-conduction-band transitions: a demonstration of a key operating principle of the intermediate-band solar cell [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(24):247701
- 10 Keith Barnham, Ian Ballard, Andreas Ioannides *et al.*. The Role of Solar Electricity in Sustainable Building (Smart Windows) [R]. www.sgr.org.uk/Conferences/Barnham2005.ppt
- 11 Giuliano Martinelli. History and perspectives of PV concentrators: Ferrara University experience [R]. March 8, 2007, http://www.ene1.portici.enea.it/Events/EnergyMed/Martinelli_Energy_Med2007.pdf
- 12 Daniel Feuermann, Jeffrey M. Gordon. High-concentration photovoltaic designs based on miniature parabolic dishes [J]. *Solar Energy*, 2002, **70**(5):423~430
- 13 Patrick Maeda. Green energy opportunities and developments in solar concentrator photovoltaic (CPV) systems [R]. http://www.keizai.org/events/files/20071024_PARC.pdf
- 14 Mark O'Neill. ENTECHS 20-year heritage and future plans in photovoltaic concentrators for both ground and space applications, presented at solar concentrator conference [R]. Alice Springs, (2003). <http://www.entechsolar.com/ISCC.pdf>
- 15 Lewis Fraas. Concentrated Photovoltaics (CPV): Path to Affordable Solar Electric Power [R]. JX Crystals Inc, <http://www.ornl.gov/sci/solarsummit/JXcrystals.pdf>
- 16 Zhiming Wu. Nanotechnology in energy applications [R]. Nov. 16, 2005, www.im.isu.edu.tw/seminar/2005.11.16.pdf
- 17 Arnulf Jaeger Waldau. PV Status: research, solar cell production and market implementation of photovoltaics [J]. *Refocus*, 2005, **6**(3):20~23
- 18 A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology [R]. Photovoltaic Technology Platform, <http://cordis.europa.eu/technology-platforms/pdf/photovoltaics.pdf>
- 19 <http://www.snec.org.cn/zh1.asp>