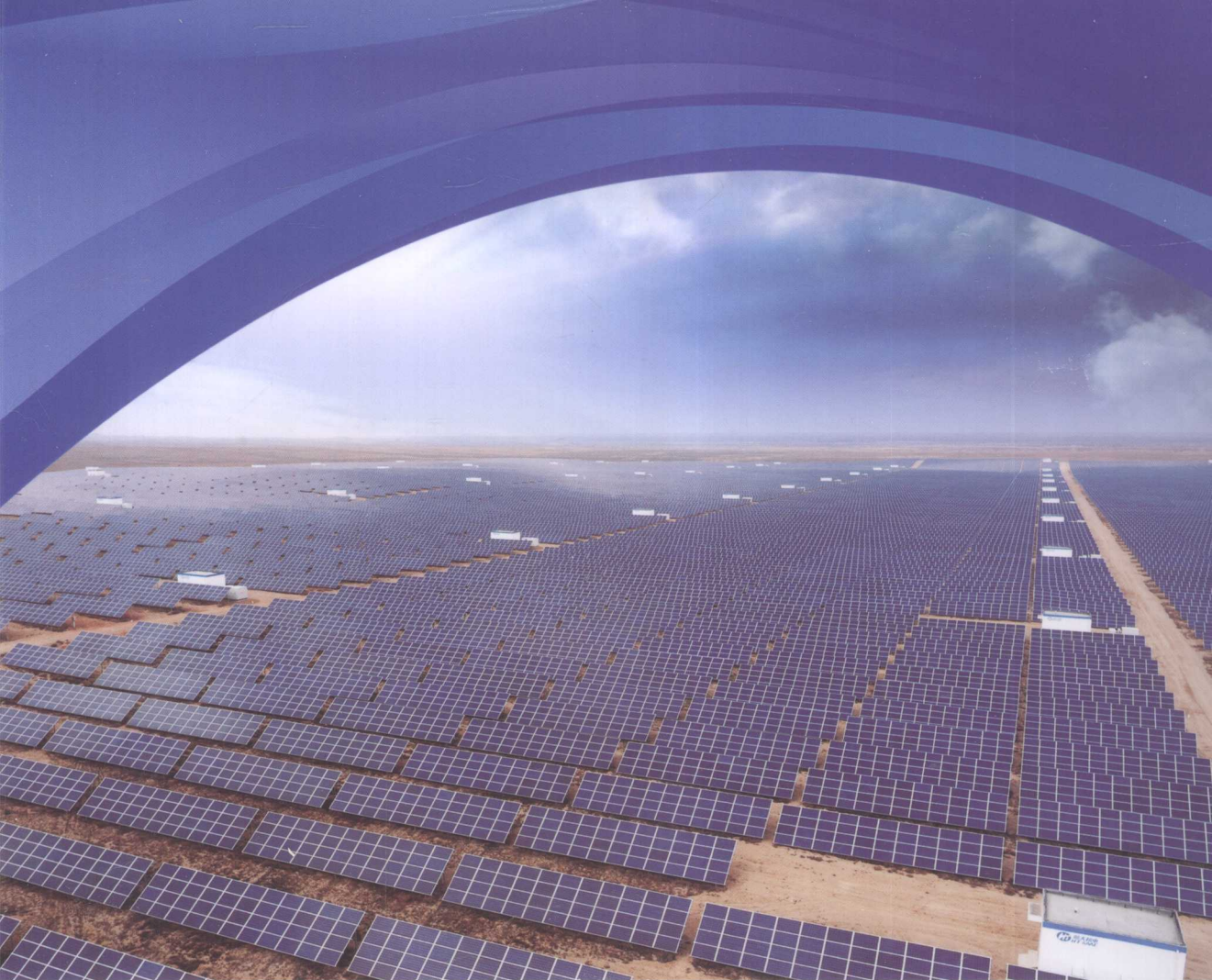




高效率太阳电池与 光伏发电新技术

魏光普 张忠卫 徐传明 刘成 等 编著



科学出版社

高效率太阳能电池与光伏发电新技术

魏光普 张忠卫 徐传明 刘 成 等编著

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书在阐明太阳能电池工作原理和基本性能参数的基础上,详细描述了晶体硅太阳能电池的先进制造工艺及理论,分析讨论了各种高效率晶体硅太阳能电池的结构特点、制造技术和产业化情况,其中包括计算机模拟设计技术。针对高效率砷化镓系列太阳能电池,详细讨论了它们的制造方法、最新研究成果以及在航天航空飞行器方面的应用。薄膜太阳能电池是将来的发展方向,本书中对非晶硅基薄膜太阳能电池、铜铟镓硒和碲化镉高效率薄膜太阳能电池、有机及钙钛矿型新型薄膜太阳能电池等都作了详细讨论。

提高光伏发电的经济效益和社会环境效益是大家追求的目标。本书讨论了近几年在这方面涌现的新思想、新技术和新设备,其中包括日光跟随器、最大功率点跟踪技术、高效光伏逆变器、直流端高压接入技术、先进储能技术、微电网和智能电网技术、光伏电站的远程监控和运行维护技术等。

本书可供太阳能电池和光伏发电相关的企业和研究机构的技术人员阅读参考,也可作为高等学校相关专业教师和学生的教材或参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

高效率太阳能电池与光伏发电新技术/魏光普等编著. —北京:科学出版社,2017.1

ISBN 978-7-03-050333-6

I. ①高… II. ①魏… III. ①太阳能电池②太阳能发电
IV. ①TM914.4②TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 257134 号

责任编辑:王艳丽

责任印制:谭宏宇 / 封面设计:殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

苏州市越洋印刷有限公司印刷

上海蓝鹰文化传播有限公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张:24 插页:4

字数:552 000

定价:90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

能源短缺和环境污染是人类长期面临的两大问题。开发利用太阳能是解决这两大难题的重要途径之一,而采用太阳电池进行光伏发电是利用太阳能的最方便有效的办法,因此世界各国对光伏发电都非常重视,截至 2015 年,世界光伏发电的累计装机容量已经达到 230 GW 以上。近十余年来,全世界的太阳电池产业得到高速发展,平均每年以 30% 左右的速度增加。特别是我国太阳电池产业的发展速度很快,自 2007 年中国太阳电池组件产量达到 1 700 MW,成为第一生产大国之后,2015 年我国太阳电池累计安装量达到 43 GW,又成为太阳电池的第一使用大国。现在太阳电池产业已经成为我国重要的战略性新兴产业,产品销往全世界。

早在 20 世纪 70 年代,上海大力发展半导体产业,作者与当时上海科学技术大学(现上海大学)冶金系电子材料专业的教师一起去有关工厂协助制造高纯多晶硅、单晶硅、硅外延片和太阳电池等电子材料和器件,后来又在学校创办太阳电池校办工厂,从事相关教学和研究工作。1984~1986 年,受国家教育委员会(现教育部)的派遣,作者在日本大阪大学工作两年,从事非晶硅太阳电池及光电器件的研究工作。1986 年回国后,继续从事晶体硅太阳电池、薄膜太阳电池和太阳电池测试设备等方面的研究工作,并先后在上海太阳能学会、上海物理学会和上海新能源行业协会负责光电专业方面的工作。这些工作经历使作者有机会更多了解太阳电池和光伏发电方面的历史和现状。特别是近几年,随着产业的迅猛发展,太阳电池的研究水平和制造技术快速提高,新方法、新材料和新技术不断涌现,工艺流程和设备不断更新,太阳电池的光电转换效率逐年提高;另外,光伏发电站的大量建设,又创造了很多新思路、新技术和新设备。为了系统反映太阳电池与光伏发电方面的新技术和新成果,作者联合了上海大学和上海航天技术研究院相关单位的专家学者共同编写了本书,以供相关企业和研究机构的技术人员参考,并可作为高等学校相关专业的教材或参考资料,为太阳电池与光伏产业的发展作贡献。

晶体硅(包括单晶硅和多晶硅)太阳电池的光电转换效率已经达到很高的水平,最高效率达到 25.6%,大规模生产效率也已经达到 18%~23%,而且工艺成熟稳定,原材料硅资源丰富且无毒性,随着生产规模的扩大和技术的进步,制造成本低廉,因此现在在全世界制造的太阳电池中 85% 是晶体硅太阳电池,在中国更是占 95% 以上,估计近 10 年内这种状况也不会有很大变化。为此,本书以很大篇幅阐述晶体硅太阳电池的先进制造工艺及理论,分析讨论了各生产企业十分关注的各种高效率晶体硅太阳电池的工艺理论研究和产业化情况。砷化镓系列太阳电池是目前效率最高的太阳电池,实验室效率已经达到 40% 以上,已成为航天航空飞行器的主要能源,有很大发展空间,本书也详细讨论了它们的制造方法和最新研究应用成果。薄膜太阳电池具有原材料消耗少、

能量回收期短、可制造柔性太阳电池等特点,特别是利用禁带宽度不同的半导体制作的多层膜太阳电池,其效率有可能提高到30%~50%,是将来的发展方向,本书中对非晶硅薄膜太阳电池、铜铟镓硒和碲化镉高效率薄膜太阳电池、有机及钙钛矿型新型薄膜太阳电池、量子点太阳电池等也作了详细描述和讨论。本书还对太阳电池的测试理论和方法,相关测试装备和标准进行了详细的分析讨论。太阳电池结构的计算机模拟分析对设计制造高效率太阳电池有很大帮助,本书也作了专题介绍。

利用太阳电池进行光伏发电是我们的目的,如何使光伏发电有更高的经济效益和社会环境效益是我们追求的目标。近几年,我国新建了数以千计的大型光伏电站和分布式光伏电站,积累了很多新技术和新经验,本书讨论了日光跟随器、最大功率点跟踪技术、高效光伏逆变器、直流端高压接入技术、先进储能技术、微电网和智能电网技术、光伏电站的远程监控和运行维护技术等近几年涌现的新技术和新设备。

本书第1~4章由魏光普编写,第5章由魏光普、王志明、徐林编写,第6章由魏光普、张忠卫、郑飞编写,第7章由魏光普、鲁贵林、汪建强、张忠卫、黄璐编写,第8章由魏光普、何涛、徐传明编写,第9章由魏光普、刘成编写,第10章由张忠卫、张梦炎编写,第11章由徐传明编写,第12章由史伟民、杨伟光、徐闰、魏光普编写,第13章由赵雷、刘成编写,第14章由魏光普、杨伟光编写,第15章由苏青峰、赖建明、魏光普编写,第16章由魏光普、吴春华、苏青峰编写,第17章由陆剑峰、杨洪东、姜德鹏、王训春编写,第18章由魏光普编写,刘成负责图片的绘制和整理工作,全书由魏光普负责统稿。在本书编写之初,杨金焕、汪光裕作为合作编写者曾经寄来部分章节,已经摘要采用;赖磊平、孙嵩泉、裴骏、何悦、叶晓军、夏世伟、王伟宏、王有林、刘进、徐环等提供了部分参考资料和建议;朱元昊、洪崇恩、蔡旗壮、王成、孙海舰提供了部分照片,在此一并致谢!我们的研究生和相关人员周文静、魏虹、陈洁利、李爱民、伍丽、郭余英等在资料收集和文稿打印方面也做了很多工作,为本书的出版作出了贡献。在本书编写过程中,参考了很多著作和文献,绝大部分已在正文和各章参考文献中说明,但很难全部列出,谨向有关作者致谢。

由于作者水平有限,掌握的资料有限,书中不妥之处在所难免,希望广大读者批评指正。

在本书的编写出版过程中,得到上海大学材料科学与工程学院、上海航天技术研究院所属上海航天汽车机电股份有限公司和上海空间电源研究所的大力支持,并且得到上海新能源行业协会、上海太阳能学会和上海市物理学会的同事和朋友们的很多帮助,在此表示深切谢意。

魏光普

2016年8月

于上海大学材料科学与工程学院

作者简介

魏光普,男,1939年生于浙江诸暨,上海大学材料科学与工程学院教授,国务院政府特殊津贴获得者,曾任上海市物理学会副理事长,上海新能源行业协会学术专家委员会主任,上海市太阳能学会光电专业委员会主任,“国际光伏科学与工程会议(PVSEC)”国际委员会委员,“国际薄膜物理与应用会议”组织委员会委员,上海市欧美同学会理事,上海市政协科技促进会专家委员会委员,上海市投资咨询公司专家委员会委员。



1956年从浙江金华二中毕业考入南京大学物理系学习,1961年毕业后,在上海科学技术大学(现上海大学)材料科学系从事X射线晶体学、近代仪器分析、太阳能电池材料及器件等方面的教学与科研工作。1984~1986年,受国家教委(现教育部)派遣,赴日本大阪大学进行访问研究,从事高效率非晶硅太阳能电池及光电器件的研究工作,发明了非晶硅X射线探测器,获日本专利两项,并获得大阪大学工学博士学位。1992年晋升为教授,1995年任日本神户大学客员教授。近20余年来,在国内外重要刊物上发表论文80余篇,获得专利10余项,并获得委、市、部级奖励4项:①“非晶硅器件的X射线照射效应及其应用”获得1992年国家教委科技进步奖;②“氧化锆增韧陶瓷(连续铸造)分离环”获得1992年上海市科技进步奖;③“无机非金属材料测试方法”获得1997年的国家建材部科技进步奖(著作(合作)奖);④“太阳能电池光电参数测试仪”获得1999年上海市科技进步奖。已有著作5部。

- (1)《半导体测量与仪器》(译著,上海科技出版社,1982年)。
- (2)《无机非金属材料测试方法》(武汉工业大学出版社,1992年)。
- (3)《点击中国——历史上的今天》(广西人民出版社,2006)。
- (4)《晶体结构与缺陷》(中国水利水电出版社,2009)。
- (5)《高效率太阳能电池与光伏发电新技术》(科学出版社,2016)。

张忠卫,男,1964年生,1985年毕业于四川大学物理系固体物理专业,后在华东师范大学



取得微电子学与固体电子学专业博士学位。1985年7月起在上海空间电源研究所(航天811所)从事太阳能电池研发工作,2001年8月晋升为研究员。2004年8月任811所太阳能电池研究室主任,2007年6月任811所所长助理,物理电源学科带头人,中国航空间主电源砷化镓(GaAs)太阳能电池首要创始人,总装备部GaAs电池首席专家,国家“973”多项重点研究攻关项目负责人,多个航天型号电源系统的总指挥;2008~2010年任上海太阳能科技有限公司总经理,2011年至今,任上海航天技术研究院控股的上海航天汽车机电股

股份有限公司光伏事业部首席技术官,航天科工集团 GW 级光伏产业链技术领军人物,联合国工业发展组织国际太阳能技术促进中心第一届学术委员会委员,亚洲光伏行业协会中国区标委会主席、科技部 863 项目评审专家,中国光伏标准委员会核心委员,上海新能源协会光伏专家委员会主任,上海市太阳能学会副理事长。在国际 IEEE 光伏专家会议和国外期刊上发表论文 11 篇;在国内专业性会议及学术刊物上发表论文 50 余篇。获得专利 30 余项。有《航天器电源系统技术概论》合著 1 本,《高效率太阳能电池与光伏发电新技术》(科学出版社,2016)合著 1 本。

获得的主要成果和荣誉如下。空间用高效砷化镓(GaAs)多结太阳能电池效率达到 30%,居国际先进水平,“七五”和“八五”期间的研究成果分别荣获航天部科技进步一等奖和二等奖,2005 年,“创新一号卫星电源系统”荣获上海市科技进步二等奖;1998 年,荣获首届“何洪燊航天科技人才奖”;2003 年,荣获“总装备部 GaAs 太阳能电池首席专家”;2004~2005 年,再次荣获航天人才奖;在民用光伏方面,攻克新一代高效 N 型 PERT 双面电池整线技术难关,156×156 mm² 电池最高效率达到 21.6%,量产平均效率达到 21%,量产技术水平居国际同类电池领先水平,单晶 60 片电池组件功率高达 347.5 W,打破世界纪录。2009~2010 年,荣获中国航天科技集团公司“优秀专利发明人”,2016 年荣获上海 SNEC 会议十周年十大科技领军人物。



徐传明,男,1972 年出生,工学博士,研究员,硕士生导师。主要从事化合物材料及铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池、半导体材料与器件物理、晶硅太阳能电池组件技术、光伏系统技术等研究工作。2007 年 1 月起任职上海空间电源研究所,从事 CIGS 薄膜太阳能电池的高效率、产业化技术研发。2012 年 12 月起先后任职连云港神舟新能源有限公司、上海太阳能工程技术研究中心有限公司,从事高效率晶硅太阳能电池组件技术研发与产业应用、光伏产品检测技术研发等工作。目前任职甘肃上航电力运维有限公司,从事光伏系统运维、评估、“互联网+”智慧能源等技术研发与产业应用工作。发表学术论文 60 多篇,合著专著两本,申请专利 10 余项,其中授权 5 项。

刘成,1980 年出生于湖南株洲。上海大学物理系副教授,主要研究方向为半导体物理与半导体器件物理。2002 年本科毕业于浙江大学信息与电子技术专业;2007 年博士毕业于中国科学院上海微系统与信息技术研究所微电子学与固体电子学专业;2007~2013 年在上海空间电源研究所工作,并于 2010 年博士后出站;2013 年到上海大学。

迄今为止共发表学术论文 50 余篇,申请专利 20 余项,主持和承担国家级、省部级科研项目 10 余项。已指导多名硕士研究生毕业。

研制出最高单模连续工作温度达 100℃ 的 1.3 μm 垂直腔面发射激光器、光电转换效率 12.31%(面积 0.28 cm²)和 7.79%(25 cm²)的柔性衬底非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池、效率 11.21%(0.5 cm²)的柔性衬底非晶硅/非晶硅锗叠层太阳能电池、基于柔性衬底的一体化光伏发电/储能薄膜电池模块。上述工作均为国内领先或率先完成,已经在国内外学术会议上发表并获奖。



目 录

第 1 章 太阳能与太阳辐射	(1)
1.1 太阳与太阳能	(1)
1.2 日地运动与太阳辐射强度随季节和地域的变化	(4)
1.3 太阳光谱与大气吸收	(8)
1.4 光的波粒二象性与光子能量	(10)
1.5 太阳辐射的光谱辐照度和光谱光子辐照度	(11)
1.6 全球和中国的太阳能资源的分布	(12)
参考文献	(13)
第 2 章 晶体学与半导体物理基础	(14)
2.1 晶体与非晶体,单晶与多晶	(14)
2.2 晶体缺陷	(19)
2.3 固体的能带理论	(20)
2.4 半导体的分类与电学特性	(28)
2.5 本征半导体的导电机制	(30)
2.6 杂质半导体的导电机制与特性	(33)
2.7 半导体的费米能级	(37)
2.8 半导体中载流子的运动与电阻率	(38)
2.9 非平衡载流子的产生与复合	(41)
2.10 半导体的光吸收	(44)
2.11 半导体的 p-n 结	(47)
2.12 半导体与金属的接触	(50)
参考文献	(52)
第 3 章 太阳电池及其性能参数	(53)
3.1 光伏效应与太阳电池	(53)
3.2 太阳电池的基本结构与工作原理	(56)
3.3 太阳电池的等效电路及电压-电流关系式	(58)
3.4 太阳电池的特性参数的理论分析	(60)
参考文献	(68)

第 4 章 太阳能电池材料的制备与测试 (69)

4.1 工业硅的制造 (69)

4.2 高纯多晶硅的制造 (69)

4.3 晶体生长 (74)

4.4 晶体生长方法 (77)

4.5 薄膜材料的制备方法 (85)

4.6 半导体材料的化学成分的检测 (85)

4.7 半导体材料电学特性的检测 (87)

4.8 薄膜厚度的测量 (90)

4.9 半导体材料光吸收系数的测量 (90)

4.10 半导体禁带宽度的测定 (91)

4.11 少数载流子寿命的测量 (92)

4.12 载流子迁移率的测量 (92)

参考文献 (92)

第 5 章 太阳能电池测试理论与技术 (94)

5.1 太阳能电池的测试标准 (94)

5.2 太阳能电池的标准测试条件 (95)

5.3 太阳能电池光电特性测试系统 (96)

5.4 测试光源与太阳模拟器 (96)

5.5 标准太阳能电池 (101)

5.6 太阳能电池光电特性测试原理与系统 (101)

5.7 太阳能电池 $I-V$ 曲线的测量设备 (103)

5.8 太阳能电池串联电阻与并联电阻的测量 (107)

5.9 太阳能电池 $I-V$ 曲线测试数据的处理与曲线拟合 (109)

5.10 太阳能电池光谱响应的测量 (116)

5.11 太阳能电池量子效率的测量 (116)

5.12 少数载流子寿命的测量 (117)

5.13 太阳能电池热斑现象的测试 (117)

5.14 太阳能电池的电致发光(EL)测试 (118)

5.15 太阳能电池的光致发光(PL)测试 (119)

5.16 太阳能电池的 PID 效应及其测试 (120)

参考文献 (120)

第 6 章 晶体硅太阳能电池制造工艺及理论 (122)

6.1 晶体硅太阳能电池的基本结构 (122)

6.2 晶体硅太阳能电池制造工艺概述 (123)

6.3 硅片的切割和检测 (125)

6.4 硅片的清洗与表面处理 (126)

6.5 去除损伤层并制作绒面 (127)

6.6 扩散法制作 p-n 结 (131)

6.7 蚀刻硅片边缘和背面的扩散层 (142)

6.8 去除硅片表面的磷硅玻璃 (143)

6.9 减反射膜的制作 (143)

6.10 背表面电场的制作 (151)

6.11 电极制作与背电场形成 (152)

6.12 电池片的性能测试与分档 (154)

6.13 吸杂效应 (155)

参考文献 (155)

第 7 章 高效率晶体硅太阳能电池 (157)

7.1 晶体硅太阳能电池的理论效率 (157)

7.2 提高太阳电池效率的主要途径 (159)

7.3 表面钝化太阳电池 (161)

7.4 埋栅太阳电池(BCSC) (165)

7.5 背电极太阳电池 (165)

7.6 弗朗霍夫太阳能研究所的局部背场电池(LBSF) (169)

7.7 HIT 和 HJT 太阳电池..... (170)

7.8 离子注入法制造的太阳电池 (172)

7.9 尚德公司的冥王星高效太阳电池 (173)

7.10 选择发射极太阳电池 (173)

7.11 选择发射极太阳电池的制备方法 (175)

7.12 高效率 PERC 电池的产业化..... (177)

7.13 高效率 n 型双面晶硅太阳电池 (180)

7.14 HBC 高效率太阳电池 (182)

7.15 黑硅太阳电池 (183)

参考文献 (185)

第 8 章 晶体硅太阳电池组件的制造 (189)

8.1 太阳电池组件的封装方式 (189)

8.2 常规太阳电池的胶膜层压封装工艺 (190)

8.3 太阳电池组件的封装材料 (192)

8.4	封装设备	(199)
8.5	光伏组件的电位诱导衰减(PID)现象及其测试	(202)
8.6	太阳电池组件的检测和认证	(203)
	参考文献	(207)
第9章	硅基薄膜太阳电池	(208)
9.1	非晶硅的基本物理性能	(208)
9.2	非晶硅薄膜的制备方法	(216)
9.3	非晶硅太阳电池的结构与制作	(219)
9.4	多结叠层硅基薄膜太阳电池	(223)
9.5	柔性衬底硅基薄膜太阳电池的大面积化和内联集成	(227)
9.6	非晶硅系太阳电池的优缺点	(229)
9.7	多晶硅薄膜太阳电池	(230)
9.8	本章小结	(231)
	参考文献	(232)
第10章	Ⅲ-V族化合物半导体太阳电池	(235)
10.1	Ⅲ-V族化合物半导体太阳电池概述	(235)
10.2	单结砷化镓太阳电池	(239)
10.3	多结砷化镓太阳电池	(244)
10.4	柔性薄膜砷化镓太阳电池	(249)
10.5	本章小结	(254)
	参考文献	(254)
第11章	化合物薄膜太阳电池	(256)
11.1	化合物薄膜太阳电池简介	(256)
11.2	铜铟镓硒薄膜太阳电池	(257)
11.3	碲化镉薄膜太阳电池	(267)
	参考文献	(272)
第12章	有机和特种薄膜太阳电池	(274)
12.1	有机薄膜太阳电池	(274)
12.2	染料敏化太阳电池	(277)
12.3	钙钛矿型太阳电池	(280)
12.4	铜锌锡硫系太阳电池	(286)
12.5	硫化锡太阳电池	(287)

参考文献	(287)
第 13 章 太阳电池的模拟仿真	(289)
13.1 光学模拟的原理与方法	(289)
13.2 常用的光学模拟软件	(290)
13.3 电学模拟的原理与方法	(291)
13.4 常用的电学模拟软件	(292)
13.5 大型综合模拟软件(TCAD)	(300)
13.6 结语	(303)
参考文献	(303)
第 14 章 聚光和特种太阳电池	(305)
14.1 聚光太阳电池	(305)
14.2 日光跟随器	(307)
14.3 球珠硅太阳电池	(308)
14.4 量子点太阳电池	(308)
14.5 全光谱太阳电池与上下转换太阳电池	(310)
参考文献	(311)
第 15 章 光伏发电总论	(312)
15.1 独立(离网)型光伏发电系统	(312)
15.2 并网光伏发电系统	(314)
15.3 光伏并网电站设备功能	(316)
15.4 光伏发电系统设置场地的选择原则	(318)
15.5 光伏电站的容量设计	(318)
15.6 太阳电池方阵的方位角与倾角的合理选择	(320)
15.7 光伏发电系统的安全设计	(324)
15.8 孤岛效应及其检测	(324)
15.9 微电网系统的应用	(325)
参考文献	(326)
第 16 章 高效光伏发电新技术	(327)
16.1 日光跟随器的应用	(327)
16.2 最大功率点跟踪技术	(327)
16.3 高效和新型逆变器	(328)
16.4 PID 效应的防止	(331)

16.5	直流端 1 500 V 接入技术	(332)
16.6	智能电网	(332)
16.7	新型电力储能系统的使用	(334)
16.8	光伏发电系统的通信和监控技术	(336)
16.9	大型光伏电站的智能管理与维护	(342)
	参考文献	(344)
第 17 章 光伏发电空间应用		(345)
17.1	光伏发电空间应用的发展历史	(345)
17.2	空间用太阳电池技术	(345)
17.3	太阳电池阵技术	(352)
17.4	光伏发电的空间应用可靠性试验	(357)
	参考文献	(361)
第 18 章 光伏发电的应用与前景		(362)
18.1	大型光伏电站	(362)
18.2	分布式光伏发电	(362)
18.3	信息和信号系统方面的应用	(364)
18.4	在日用电器方面的应用	(364)
18.5	在农、林、牧、渔业方面的应用	(364)
18.6	光伏发电作为电解水制造氢气和氧气的电源	(365)
18.7	在交通和环境保护方面的应用	(366)
18.8	光伏发电与太阳能采暖集成建筑	(368)
18.9	全球联网和太空光伏发电	(369)
	参考文献	(370)
后记		(371)
彩图		

第 1 章 太阳能与太阳辐射

1.1 太阳与太阳能

根据天文学的研究,太阳系大约形成于 46 亿年以前,由宇宙星云在万有引力作用下凝聚而成。太阳是太阳系中心的灼热恒星,包括地球在内的所有太阳系行星和无数小天体都围绕太阳在一定的轨道上做旋转运动,各个行星和太阳本身还在绕轴自转,万有引力维系着这个体系的运动。

太阳时刻不断地向地球输送着巨大的能量,这些来自太阳的能量称为太阳能。狭义地说太阳能是指太阳光的辐射能,又称为太阳辐射能。广义地说太阳辐射能、风能、水力能、生物质能、潮汐能都属于太阳能,因为它们都是由太阳、地球和月球的运动而产生的。太阳、地球和月球的运动几十亿年内不会停止,所以太阳辐射能、风能、水力能、生物质能、地热能、潮汐能等也是周而复始地循环,永不枯竭,因此把它们称为可再生能源。

能源短缺和环境污染已经成为人类面临的最大问题。太阳辐射能、风能、水力能、生物质能、地热能、潮汐能等可再生能源不但数量巨大,永不枯竭,而且是不会产生环境污染的清洁能源。因此推广使用可再生能源是今后的必然趋势。

1.1.1 太阳的基本结构

太阳的内部结构十分复杂,从中心向外大致可分为核心区、辐射层、对流层和太阳大气层,但各个区域没有明确的分界线,图 1.1 是太阳的基本结构图。太阳核心区的半径大约是太阳半径的 $1/4$,其质量占整个太阳质量的一半以上。太阳大气层也大致可按不同的高度和不同的性质从内向外分为光球、色球和日冕三层。光球就是我们平常看到的光亮的太阳圆面,通常所说的太阳直径也是指光球的直径。光球是太阳大气的最底层,它的厚度约有 500 km。光球层是不透明的,因此我们不能直接看见太阳内部的结构。应用天文望远镜可以观察到太阳表面有不断变化的黑子、耀斑、日冕等的激烈活动。太阳的表面温度约为 6 000 K,从太阳表面到太阳内部,温度、压力和密度不断增大,中心区的温度高达 1.5×10^7 K,压力高达 2 000 多亿个大气压。

太阳的直径约为 139 万 km,比地球直径大 109 倍左右。太阳的体积约 $1.4 \times 10^7 \text{ m}^3$,

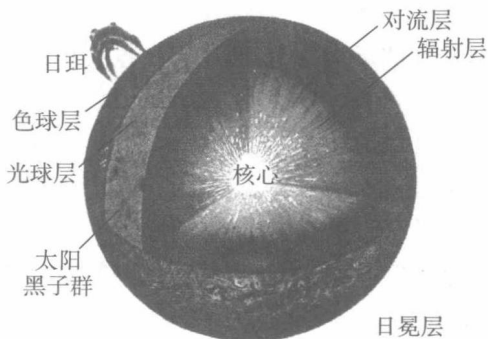


图 1.1 太阳的基本构造示意图

比地球体积大 130 万倍。太阳的质量约为 2×10^{30} kg, 相当于地球质量的 33 万余倍。

太阳核心区的密度高达 158 g/cm^3 左右, 但其平均密度却只有 1.41 g/cm^3 , 仅为地球密度的 $1/4$ 。对太阳光的光谱分析和太阳宇宙射线粒子的分析表明, 太阳的主要构成物为氢, 约占总质量的 71.3%, 其次是氦, 约占 27%, 此外还存在元素周期表中的大部分元素, 但相对含量都很低。由于太阳内部的温度和压力都非常高, 各种物质都已经离化为等离子体, 不同原子核之间的相互碰撞可能引起各种各样的热核反应, 这些热核反应是太阳能量的来源。研究表明由氢转变为氦的核聚变反应是主要的能量来源。几十亿年来, 太阳内部的这种核聚变反应产生的巨大能量使太阳成为炽热的星球。据测算, 太阳每秒钟大约有 6×10^{11} kg 的氢转变为氦, 并伴有 4×10^3 kg 的质量亏损。根据爱因斯坦的质能关系式 $E=mc^2$, 这些质量的消失会产生 3.6×10^{20} J 的能量, 正是这些能量使太阳维持着炽热的高温状态。太阳内部热核反应产生的能量主要以紫外线至红外线的电磁波形式向太空辐射, 称为太阳辐射。此外太阳还以宇宙线和太阳风的形式向外抛射各种粒子流。太阳的总质量约为 2×10^{30} kg, 根据氢聚变为氦的速度可以估算出它还可以存在数十亿年。数十亿年是一个漫长的岁月, 因此可以说太阳是一个取之不尽、用之不竭的巨大能源。

1.1.2 太阳辐射能

炽热的太阳以太阳辐射的形式向四面八方的广阔宇宙空间传递能量, 太阳辐射由紫外线至红外线的广谱电磁波构成, 它们携带的能量称为太阳能。太阳辐射的功率密度常称为太阳辐射强度, 又称为日照强度。从太阳发出的太阳辐射强度是与其传递距离的平方成反比, 由于太阳与地球的平均距离(日地距离)有 1 亿 5 000 万千米之遥, 比地球半径 6 378 km 大 23 万余倍, 由此可算出太阳辐射的能量大约只有 22 亿分之 1 到达地球, 而且太阳光到达地球时, 基本上就是平行光了。

地球大气层上界的太阳辐射功率密度接近于常数, 称为“太阳常数”。太阳常数的严格定义是在日地平均距离处, 垂直于太阳辐射方向的单位面积上单位时间内接收到的太阳辐射能。实际上, 由于地球围绕太阳旋转的轨道是椭圆形的, 在近日点与远日点的日地距离有 3% 左右的差别, 因此地球大气层上界的太阳辐射功率密度也随日地距离的变化而变化。多年来人们利用高空飞机、高空气球以及空间飞行器, 对地球大气层上界的太阳辐射功率密度进行精确测量, 结果表明在远日点时其数值约为 1309 W/m^2 (每年 7 月 4 日左右), 在近日点时约为 1399 W/m^2 (每年 1 月 3 日左右)。由于两个数值差别不大, 可以认为是个常数。20 世纪 60 年代根据美国航空和航天局、美国材料试验学会测定商议, 把太阳常数定为 1353 W/m^2 (瓦/米^2)。1981 年 10 月, 世界气象组织仪器和观测方法委员会在墨西哥召开的第八届会议上, 根据当时大量的实测结果, 建议把太阳常数定为 $(1367 \pm 7) \text{ W/m}^2$, 也常简写为 136.7 mW/cm^2 , 这个数值后来被各国科学工作者接受^[1-3]。另外, 根据计算和测量, 金星和火星的太阳常数分别为 2610 W/m^2 和 590 W/m^2 ^[4]。

如图 1.2 所示, 根据太阳常数和地球的最大截面积, 可以计算出地球接收到的太阳辐射总强度。由于地球是一个椭球体, 其长径为赤道半径 6 378 km, 而南北方的半径为 6 356 km, 若

取其短径计算其截面积,则可算出地球接收到的太阳辐射总功率为

$$1\,367(\text{W}/\text{m}^2)\times/\pi(6\,356\text{ km})^2=1.735\times10^{14}\text{ kW}$$

这也就是说每小时大约有 $1.735\times10^{14}\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的能量从太阳到达地球,这个数值非常大,比目前全世界每年消费的电力还要大数十万倍。

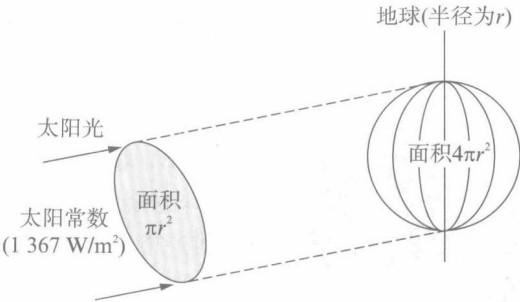


图 1.2 地球接收到的太阳辐射总强度的计算

1.1.3 太阳辐射在地球大气中的吸收与散射

地球周围大约有数十千米厚度的大气层,其中含有氮、氧、二氧化碳、水蒸气等多种气体。根据测算,太阳辐射到达地球的能量大约有 3%被大气中的各种气体分子和尘粒散射回宇宙空间,有 19%被大气吸收与散射,只有 51%左右穿过大气层到达地球表面,所以虽然到达地球的总功率为 $1.735\times10^{14}\text{ kW}$,但到达地球表面的总功率只有 $8.7\times10^{13}\text{ kW}$ 左右。据测量,在地球赤道附近的海平面上,正午垂直入射时,太阳辐射功率密度接近于 $1\,000\text{ W}/\text{m}^2$,也就是 $100\text{ mW}/\text{cm}^2$,所以常常用这个数值作为测量太阳电池性能时光照强度的标准。图 1.3 是天气晴朗时太阳辐射强度在地球大气层中的吸收、散射和衰减的大致情况^[5,6]。

由于大气中各种气体分子和尘埃的散射的存在,加以地面上各种山体、建筑物和树木等的反射和散射,在地面上实际观察到的太阳辐射可以分为直接辐射和间接辐射两大部分,直接辐射是指直接到达观察点的太阳辐射,而间接辐射是指太阳光经过大气和其他各种物体散射后到达观察点的辐射线。

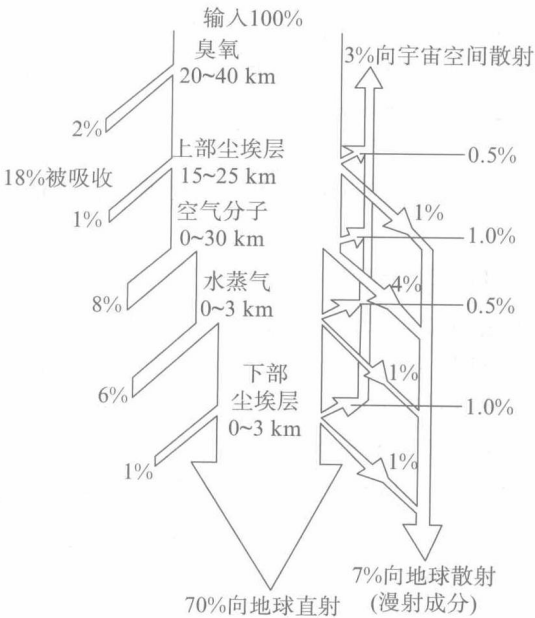


图 1.3 太阳辐射强度在地球大气层中的衰减情况

1.1.4 太阳辐射强度的测量

太阳辐射的强度可以用太阳辐射计来测量,多个厂家制造了多种形式和类型的太阳辐

射计。大多数辐射计的原理是在一个绝热遮光的盒子内安装有一块黑体材料,它能够吸收各种波长的太阳光并将这些光转化为热,使其温度升高。太阳辐射可以通过盒子上方的小孔照射在黑体上,太阳辐射强度越高,则黑体的温度越高,利用高灵敏度的热电偶或半导体测温计可以测量其温度,经过一定的标定手续,可以得到该辐射计的辐照强度与黑体温度的关系曲线,就可以作为辐照强度计了。一般在进光孔的上面配备有平行光管,使平行光管对准太阳光,就可以测量直接辐射的强度,拿去平行光管,则可以测量包含直接辐射和各种散射辐射在内的总辐射强度。

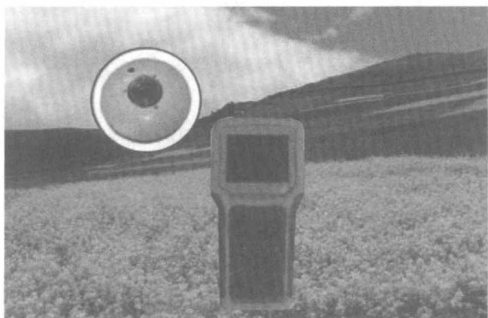


图 1.4 一种太阳辐射强度测量计的照片

图 1.4 是杭州迈煌科技有限公司生产的 MH-TF1 太阳辐射速测仪,它根据热电效应原理,采用绕线电镀式多接点热电堆方法将太阳辐射的能量转化为电信号,并采用双层精密石英玻璃罩构成绝热密封透光装置。可用来测量光谱范围为 $0.3\sim 3\mu\text{m}$ 的太阳辐射总能量,加不同的遮光环可分别测量直接辐射或散射辐射,如果使感应面向下,则可测量反射辐射。测量的辐射强度范围在 2000 W/m^2 以内,测量精度为 $\pm 1\text{ W/m}^2$,分辨率约为 0.1 W/m^2 ,响应时间

小于 35 s 。该仪器采用低功耗技术设计,电池供电,无需外部电源,体积小,整机功耗小,液晶显示输出,随时可以通过显示屏观察当前数据。该测试仪还可与计算机配合进行超长时间数据跟踪记录 and 数据处理,具有断电数据自动存储保护功能,并可配置 GPS 模块、GPRS 模块、短信模块等进行信息传送,可广泛应用于太阳能发电、光伏发电系统、气象检测站及其他相关辐射的测试工作。

1.2 日地运动与太阳辐射强度随季节和地域的变化

对地球表面某一观察点而言,太阳辐射强度(日照强度)随季节与地域不断变化,这种变化是由于太阳与地球的相对运动(日地运动)和各种气象原因造成的。在建造光伏电站时,地址应该选择在太阳能资源丰富的地方,同时为了提高太阳电池的发电效率,太阳电池组件(方阵)的法线方向必须尽量与太阳光线的方向一致,以接收更多的太阳辐射能,为此必须研究日照强度和方向随季节和地域的变化规律。这些变化规律可以用太阳时角、赤纬角、高度角、方位角的变化情况来描述^[7]。另外,利用单轴或双轴日光跟随系统(又称追日系统),使太阳电池组件的方向随着日照方向的改变而变化,也可提高太阳电池的发电效率 $15\%\sim 30\%$ 。

1.2.1 经纬网与太阳时角

地球表面上任何地点的位置都可以用经线和纬线的交叉点来表示。经线和纬线相互垂直,构成经纬网,成为标志地球表面地点的坐标系。例如,上海处在东经 121.4° ,北纬 31.2° 。

经线也称为子午线,它是通过南北两极和地球中心的平面与地球表面的(虚拟)交线,是