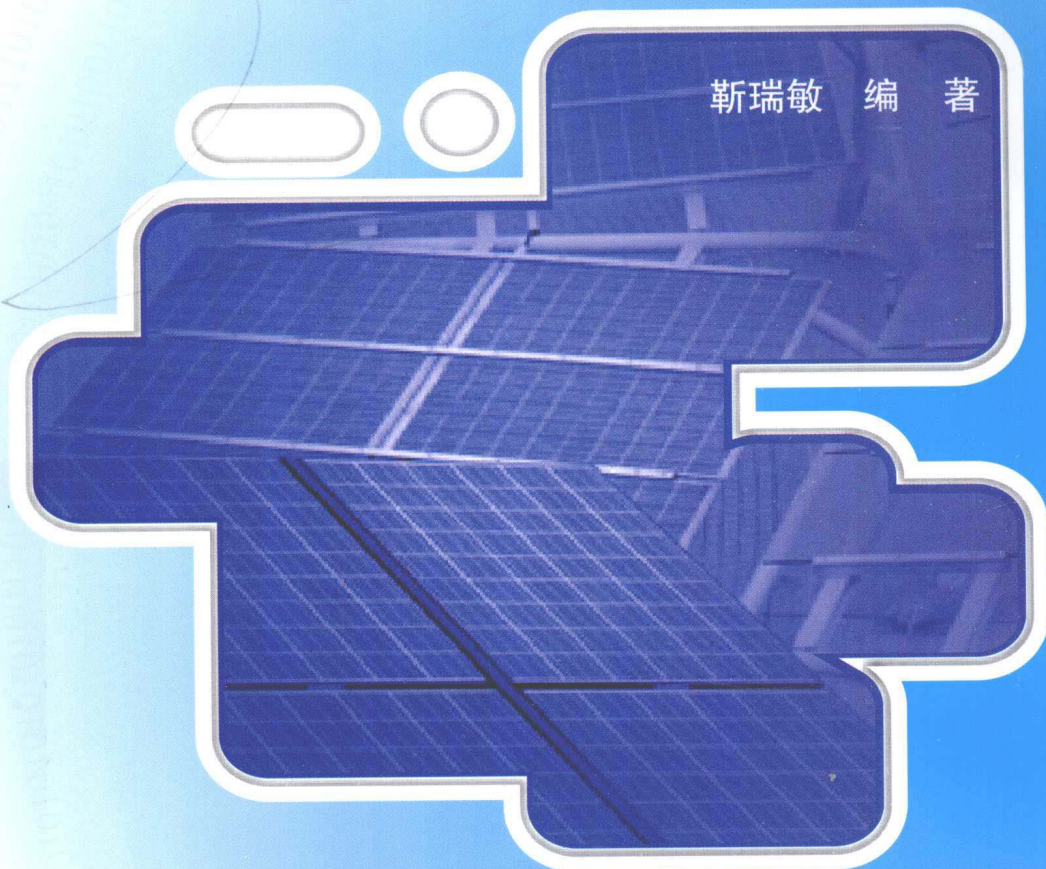




21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

太阳能电池 原理与应用

靳瑞敏 编 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

太阳能电池原理与应用

靳瑞敏 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

太阳能光伏发电具有充分的清洁性、绝对的安全性、资源的相对广泛性和充足性、长寿命以及易于维护等其他常规能源所不具备的优点,符合保护环境和可持续发展的要求。光伏能源被认为是 21 世纪最重要的新能源,光伏发电对解决人类能源危机和环境问题具有重要的意义。

本书主要内容包括:太阳能简介、太阳电池原理、晶硅太阳电池、太阳能玻璃、硅薄膜太阳电池、薄膜生长中的量子态现象、多晶硅薄膜的制备、太阳电池应用系统、太阳电池多晶硅、物理法太阳电池多晶硅。

本书可作为太阳电池领域工作者和相关专业学生的参考书,也可作为太阳电池领域和将要进军该领域的大公司的专业知识培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能电池原理与应用/靳瑞敏编著. —北京:北京大学出版社, 2011. 5

(21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-18672-5

I. ①太… II. ①靳… III. ①太阳能电池—高等学校—教材 IV. ①TM914. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 048357 号

书 名: 太阳能电池原理与应用

著作责任者: 靳瑞敏 编著

责任编辑: 程志强

标准书号: ISBN 978-7-301-18672-5/TP · 1161

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印刷者: 北京富生印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 13 印张 297 千字

2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

序

目前全球大部分能耗来自于化石能源(煤炭、石油和天然气),其他来自于新能源。世界能源委员会预测,按照资源探明储量和目前的需求速度,化石能源将走向枯竭,新能源特别是太阳能光伏能源,因其具有充分的清洁性、绝对的安全性、相对的充足性、长寿命以及易于维护等其他常规能源所不具备的优点,被认为是 21 世纪最重要的新能源,光伏发电对解决人类能源危机和环境问题具有重要的意义。

我国能源短缺,结构性矛盾特别突出。目前我国煤炭能源占总能源的比例高达三分之二以上,这种不合理的能源结构不但造成煤的过分开采和资源浪费,而且煤的直接燃烧是造成了大气污染的主要原因。改变能源结构,开发利用太阳能电池技术,成为我国能源战线的一项紧迫任务。

我国发展太阳能光伏发电具有得天独厚的条件,我国有三分之二以上的地区年日照时数在 2000 小时以上,太阳能资源十分丰富,具有建设大型太阳能光伏电站的极好条件。另外,目前我国还有部分无电人口,主要分布在边远贫困山区和岛屿,这些地方用常规能源联网解决不仅困难,而且也很不经济,采用光伏发电方式是极其合适的选择。目前我国光伏产业还处于初级阶段,发展前景广阔,光伏光电产业已成为我国乃至全世界最具竞争优势的新兴产业之一,深度发展的条件已具备,产业潜力巨大,已成为新能源产业发展的必然趋势和选择。为了推动我国光伏技术和产业的发展,国家制定了鼓励光伏产业发展的规划。

另外,我国正处在“调整和优化产业结构,促进产业结构升级,转变经济增长模式”时期,发展高科技光伏能源产业符合国家产业政策。国家产业结构调整为我国传统产业尽快转型提供了难得的历史机遇。传统产业转型的意义不仅仅局限于产能、销售、利润,更重要的是对社会的贡献和应尽的责任。

要实现产业转型,特别是转变为具有核心竞争力的高科技现代化企业,最关键的就是人的思想的转变和素质的提高,这就要求必须不断学习和更新知识。本书的出版为读者了解太阳能电池研究现状及生产技术提供了很好的素材。

蔡志端

目 录

第1章 太阳能简介	1
1.1 太阳辐射	1
1.2 太阳能应用	3
1.3 太阳电池的发展	4
习题	9
本章参考文献	9
第2章 太阳电池原理	10
2.1 光伏效应	10
2.1.1 半导体简介	10
2.1.2 电子-空穴对	12
2.1.3 P-N 结	13
2.1.4 P-N 结的能带结构	14
2.1.5 光照下的 P-N 结	15
2.1.6 光照下的 P-N 结电流 方程	16
2.1.7 太阳电池的表征参数	17
2.1.8 太阳电池的等效电路	18
2.2 太阳电池的特点	19
2.3 太阳电池的分类	19
2.3.1 晶硅太阳电池	20
2.3.2 薄膜太阳电池	21
习题	23
本章参考文献	24
第3章 晶硅太阳电池	26
3.1 晶硅太阳电池生产的一般工艺	26
3.1.1 硅片切割	26
3.1.2 硅片的清洗	27
3.1.3 制绒	27
3.1.4 扩散	28
3.1.5 等离子边缘刻蚀	30
3.1.6 去磷硅玻璃	30
3.1.7 制备减反射膜	31
3.1.8 制作电极	31
3.1.9 烧结	31
3.1.10 测试	32
3.2 晶硅太阳电池生产线设备	32
3.3 影响太阳电池效率的因素及 改进方法	33
3.3.1 影响太阳电池效率的 主要因素	33
3.3.2 提高电池效率的方法	33
3.4 太阳电池组件	34
3.4.1 太阳电池组件的结构	35
3.4.2 太阳电池组件的封装 材料	36
3.4.3 太阳电池组件的生产 工艺	37
3.4.4 太阳电池组件的生产 设备	40
习题	42
本章参考文献	42
第4章 太阳能玻璃	43
4.1 太阳能玻璃简介	43
4.2 压延光伏玻璃	44
4.2.1 光伏玻璃原料选择的 一般原则	44
4.2.2 光伏玻璃的原料	45
4.2.3 碎玻璃的使用	47
4.2.4 光伏玻璃的化学组成	47
4.2.5 压延光伏玻璃的生产	48
4.3 浮法光伏玻璃	48
4.3.1 浮法玻璃生产线	48
4.3.2 浮法成形的特点	49
4.3.3 浮法锡槽技术	51
4.3.4 玻璃退火	54
4.4 光伏玻璃减反膜	56
4.4.1 生产过程中需要控制的 要素	57
4.4.2 溶胶-凝胶法的优缺点	60



4.5 玻璃的钢化	61	6.3 量子态现象的特征	102
4.5.1 玻璃中的应力	61	6.4 量子态现象的原因分析	103
4.5.2 钢化玻璃方法	62	6.5 量子态现象的物理思想	105
4.5.3 钢化玻璃的特点	63	6.6 等能量驱动原理	107
4.6 低辐射玻璃	64	习题	108
4.6.1 玻璃对红外和紫外射线的 吸收	64	本章参考文献	109
4.6.2 低辐射玻璃	65	第7章 多晶硅薄膜的制备	111
4.6.3 低辐射玻璃的生产方法	65	7.1 常规电阻炉退火制备多晶硅 薄膜的研究	111
习题	66	7.1.1 常规电阻炉退火的温度 研究	113
本章参考文献	66	7.1.2 常规电阻炉退火的时间 研究	115
第5章 硅薄膜太阳电池	67	7.2 光退火制备多晶硅薄膜的研究	119
5.1 透明导电氧化物薄膜	67	7.2.1 光退火的温度研究	119
5.1.1 ZAO 薄膜的特性	67	7.2.2 光退火的时间研究	121
5.1.2 太阳电池对 TCO 镀膜 玻璃的性能要求	69	7.3 常规电阻炉退火与光退火固相 晶化的对比	124
5.1.3 ZAO 导电膜的研究现状及 制备方法	70	7.4 硅薄膜结构和性能的自然衰变	127
5.1.4 磁控溅射镀膜的物理 过程	72	7.5 关于硅薄膜与玻璃基底的结合 问题	129
5.1.5 溅射镀膜的特点	74	7.6 光退火制备多晶硅薄膜的计算	130
5.1.6 直流反应磁控溅射结构	75	习题	133
5.1.7 溅射操作程序	76	本章参考文献	134
5.1.8 TCO 结构性能指标分析	76	第8章 太阳电池应用系统	135
5.1.9 影响 TCO 薄膜性能的主要 因素	79	8.1 独立型太阳电池系统	135
5.2 硅薄膜太阳电池的生产	82	8.1.1 独立太阳电池系统的 特点	136
5.2.1 硅薄膜材料性能表征	83	8.1.2 独立太阳电池系统的基本 组成	137
5.2.2 非晶硅太阳电池制备的 基本方法	84	8.1.3 太阳电池用蓄电池	137
5.2.3 影响硅薄膜性能的主要 因素	86	8.1.4 太阳电池组件的容量 设计	143
5.2.4 非晶硅太阳电池的结构	87	8.1.5 控制器	144
5.2.5 工业化非晶硅太阳电池的 生产设备	89	8.1.6 太阳电池系统用灯具	146
习题	91	8.2 并网型发电系统	146
本章参考文献	92	8.2.1 并网系统电路的组成及总体 设计	147
第6章 薄膜生长中的量子态现象	94	8.2.2 光伏组件	148
6.1 现有几种主要的薄膜生长理论	94	8.2.3 光伏并网逆变器	148
6.2 薄膜生长过程中的量子态现象	97		

8.3 混合型发电系统	148	9.1.3 薄膜太阳能电池的对比	164
8.4 逆变器	149	9.2 太阳能电池多晶硅的现状	167
8.5 最大功率点跟踪系统	151	9.3 硅及冶金硅	168
8.6 太阳能庭院灯的设计安装	153	9.3.1 硅的概况	168
8.6.1 系统设计所需的数据	153	9.3.2 冶金硅的生产	169
8.6.2 系统设计参数的确定	153	9.4 化学法太阳能电池多晶硅	172
8.6.3 系统定期检查	154	9.4.1 改良西门子法	173
8.7 LED 太阳能草坪灯的设计安装	154	9.4.2 改良西门子法的生产 工艺	174
8.7.1 LED 太阳能草坪灯简介	154	9.4.3 锌还原法	176
8.7.2 太阳能草坪灯的控制 原理	154	9.4.4 硅烷法	177
8.7.3 太阳能草坪灯充放电 控制器的设计	156	习题	178
8.7.4 太阳能草坪灯的电路 原理	157	本章参考文献	178
8.7.5 太阳能草坪灯系统组合中的 几个问题	158	第 10 章 物理法太阳能电池多晶硅	179
8.8 光伏建筑一体化	158	10.1 物理法太阳能电池多晶硅简介	179
8.8.1 光伏建筑一体化的优势	159	10.2 物理法除杂方法	180
8.8.2 光伏建筑一体化的几种 形式	160	10.2.1 吹气法	180
8.8.3 建筑一体化对电池组件的 要求	160	10.2.2 造渣静置澄清法	180
习题	161	10.2.3 湿法冶金	181
本章参考文献	161	10.2.4 物理法真空冶炼	182
第 9 章 太阳能电池多晶硅	162	10.2.5 多晶硅铸锭	183
9.1 太阳能电池材料的对比	162	10.2.6 直拉单晶法	188
9.1.1 硅材料地位的确定	162	10.2.7 电子束真空熔炼	190
9.1.2 体材料与薄膜材料的对比	163	10.2.8 等离子感应熔炼	191
		10.2.9 磁场去除法	192
		10.3 太阳能级多晶硅国家标准的 思考	194
		习题	196
		本章参考文献	196

第1章

太阳能简介

万物生长靠太阳。地球上的风能、水能、海洋温差能、波浪能和生物质能以及部分潮汐能都来源于太阳;即使是地球上的化石燃料(如煤、石油、天然气等),从根本上说也是远古以来储存下来的太阳能。太阳能及太阳辐射能是什么?对人类有什么影响?人类利用太阳能主要有几种形式?太阳能电池经历了怎样的发展过程?这些问题都可以在本章找到答案。

1.1 太阳辐射

太阳是距离地球最近的一颗能够自己发光的天体,它给地球带来了光和热。太阳的活动来源于其中心部分,中心温度高达 1500 万摄氏度,在这里发生着核聚变,太阳能是太阳内部连续不断的核聚变反应产生的能量。聚变产生能量,能量被释放至太阳的表面,通过对流过程散发出光和热。太阳核心的能量需要经过几百万年才能到达它的表面,使太阳能够发光。到现在为止,太阳的年龄约为 46 亿年,它还可以继续燃烧约 50 亿年。根据现在的宇宙学理论,太阳存在的最后阶段,太阳中的氦将转变成重元素,太阳的体积也将开始不断膨胀,直至将地球吞没。在经过一亿年的红巨星阶段后,太阳将突然坍缩成一颗白矮星——所有恒星存在的最后阶段。再经历几万亿年,它将最终完全冷却。地球年消耗能量的总和只相当于太阳 40 分钟内投射到地球表面的能量^[1],太阳辐射能来源于其内部的热核反应,每秒转换的能量约为 $4 \times 10^{26} \text{J}$,基本上都是以电磁辐射的形式发射出来,通常将太阳看成是温度 6000K、波长 $0.3 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 的辐射体,辐射波长的分布从紫外区到红外区。尽管地球所接收到的太阳辐射能量仅为太阳向宇宙空间放射的总辐射能量的二十二亿分之一,达到地球大气层外的太阳辐射能在 $132.8 \sim 141.8 \text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 之间,被大气反射、散射和吸收之后,约有 70% 投射到地面,但也高达 $1.73 \times 10^{15} \text{W}$,也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于燃烧 500 万吨煤所释放的能量,是全球能耗的数万倍。

地面接收到的太阳辐射包括直接辐射和散射辐射。直接接收到的、不改变方向的太阳辐射称为直接辐射,被大气层反射和散射后方向改变的太阳辐射称为散射辐射。

为了定量描述太阳能,需要引入一些概念。在地球位于日地平均距离处时,地球大气上界垂直于太阳光线的单位面积在单位时间内所收到的太阳辐射的全谱总能量,称为太阳常数。太阳常数的数值为 $1353 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ (瓦·米⁻²)。将大气对地球表面接收太阳光的影响程度定义为大气质量(AM)。大气质量是一个无量纲量,它是太阳光线穿过地球大气的

路径与太阳光线在天顶角方向时穿过大气的路径之比,并假定在标准大气压(101325Pa)和气温的0℃时,海平面上太阳光垂直入射的路径为1。AM 数值不同,太阳光谱会产生不同的变化。当太阳辐射强度为太阳能常数时,大气质量记为 AM_0 , AM_0 光谱适合于人造卫星和宇宙飞船上的情况。大气质量 AM_1 的光谱对应于直射到地球表面的太阳光谱(其入射光功率为 $925 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)。图 1.1 给出了 AM_0 和 AM_1 两种条件下的太阳光谱,它们之间的差别是由大气对太阳光的吸收引起的衰减所造成的,主要来自臭氧层对紫外光的吸收和水蒸气对红外光的吸收,以及空气中尘埃和悬浮物的散射。图 1.1 中太阳光谱辐照度 $E_\lambda = dE/d\lambda$, 其中, E 为单位波长间隔的太阳辐射度。太阳光谱的这些特点对太阳能电池材料的选择是一个很重要的因素^[2]。

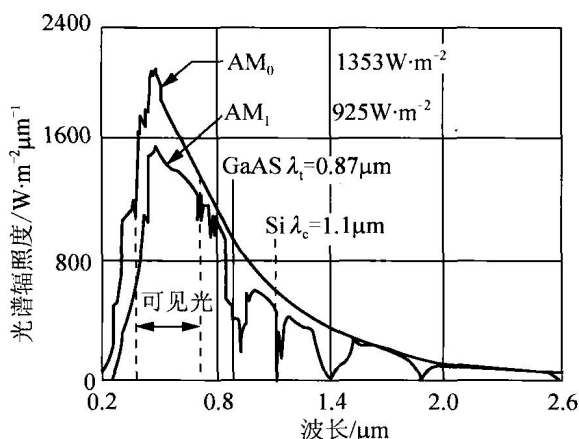


图 1.1 AM_0 和 AM_1 条件下太阳光谱

太阳活动同地球上的一些现象存在着密切的关系。现在,人们已经发现太阳活动在以下几方面对地球有显著的影响。太阳活动中的耀斑和黑子对地球的电离层、磁场和极区有显著的地球物理效应,使地面的无线电短波通信受到影响,甚至出现短暂的中断,这被称为“电离层突然骚扰”,这些反应几乎与大耀斑的爆发同时出现。磁场沿磁力线下来,与色球层气体相碰撞,使中性线两侧磁力线的足跟部位发光,成为人们所见到的耀斑。耀斑本身是磁场不稳定的结果,正是由于磁场的这种非平衡状态,导致了耀斑的爆发,以达到磁场新的平衡,耀斑的爆发过程同时也是大量能量的释放过程。较大的耀斑爆发不但使氢原子的热运动温度可达几千万甚至上亿摄氏度,并且有很强的 X 射线、紫外光线以及高能质子放出。这些强烈的辐射光线增加了氢原子的压力,使氢原子、离子及其他微粒以超过 $1000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度抛出,称为太阳的微粒辐射。“磁暴”现象说明整个地球是一个大磁场,地球的周围充满了磁力线。当耀斑出现时,其附近向外发射高能粒子,带电的粒子运动时产生磁场,当它到达地球时,便扰乱原来的磁场,引起地磁的变动。发生磁暴时,磁场强度变化很大,对人类活动特别是与地磁有关的工作会有很大影响。太阳影响地球的另一个现象是极光现象:地球的南北两极地区,在晚上甚至在白天,常常可以看见天空中闪耀着淡绿色或红色、粉红色的光带或光弧,叫做极光。这是因为来自太阳活动的带电高能粒子流到达地球时,在磁场的作用下奔向极区,使极区高层大气分子或原子激发或电离而产生光。太阳的远紫外线和太阳风会影响大气的密度,大气密度的变化周期为 11 年,显然与太阳活动有关。太阳活动还可能影响到大气温度和臭氧层,进而影响到农作物的产量



和自然生态系统的平衡。由于太阳活动对人类有影响，特别是对航天、无线电通信、气象等方面影响显著，因此，研究太阳活动，特别是太阳耀斑发生的规律，并设法进行预报，对太阳能的利用具有重要的价值。

1.2 太阳能应用

原则上，太阳能可以转换为任何形式的能量。

(1) 太阳能转换为热能是最常见的一种，光热利用主要为采暖，例如，家庭用的太阳能热水器。一般来说黑色吸收面吸收太阳辐射性能好，可以将太阳能转换成热能，但辐射热损失大；选择性吸收面具有高的太阳吸收比和低的发射比，吸收太阳辐射的性能好，且辐射热损失小，是比较理想的太阳能吸收面。

(2) 太阳能—生物化学能转换。光化学反应不同于热化学反应，只要光的波长能被物质所吸收，即使在较低的温度下依然可以进行，光化学应用常见的有绿色植物的光合作用，通过植物的光合作用，太阳能把二氧化碳和水合成有机物(生物质能)并放出氧气。光合作用是地球上最大规模转换太阳能的过程，现代人类所用的燃料是远古和当今光合作用所固定的太阳能，目前，人们对光合作用的机理尚不完全清楚，能量转换效率一般只有百分之几，今后对其机理的研究具有重大的理论意义和实际意义。人类与动物的视觉，涂料与高分子材料的光致变性，及常见的照相光刻、有机物化学反应的光催化等都是太阳能—生物化学能转换。

(3) 太阳能—机械能转换。20 世纪初，前苏联物理学家用实验证明光具有压力，并进一步提出，利用在宇宙空间中巨大的太阳帆，在阳光的压力作用下可推动宇宙飞船前进，将太阳能直接转换成机械能。通常，太阳能转换为机械能，需要通过中间过程进行间接转换。

(4) 太阳能—光能转换。光电利用太阳能在光电建筑方面应用广泛，如太阳能屋顶、光伏幕墙等光电建筑一体化。根据我国所处的位置特点，太阳能电池板朝南才能更好地吸收太阳光。

太阳能应用涉及的技术问题很多，太阳辐射的能流密度低，在利用太阳能时为了获得足够的能量，必须采用一定的技术和装置，对太阳能进行采集、储存和利用。所以，根据太阳能的特点，具有共性的技术主要有 4 项，即太阳能采集、太阳能转换、太阳能储存和太阳能传输。

本书主要讲述太阳能—电能转换，称为光伏效应，就是通常所说的太阳能电池，简称太阳电池。太阳能热利用和太阳电池的应用如图 1.2、图 1.3、图 1.4、图 1.5 所示。



图 1.2 太阳能热利用(作者摄于西藏布达拉宫前)



图 1.3 神州七号太阳电池

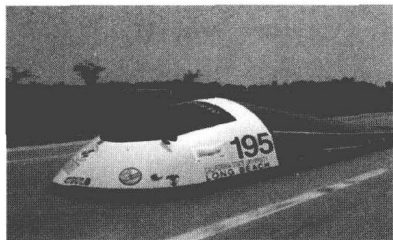


图 1.4 太阳能电池汽车

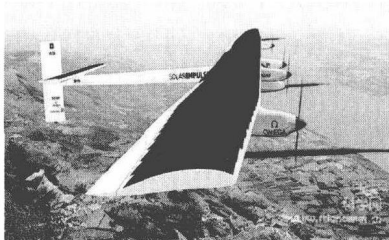


图 1.5 太阳能电池飞机

1.3 太阳能电池的发展

爱迪生早在 1932 年就说过,人们迟早将不得不从太阳直接获得能量作为主要能源的供应^[3]。20 世纪 50 年代,第一个实用化的硅太阳能电池在美国贝尔实验室诞生了^[4],不久,它即被用于人造卫星的发电系统上。迄今为止,太空中成千上万的飞行器都装备了太阳能电池发电系统。由于发电成本过高,太阳能电池在地面的应用一直停滞不前。太阳能电池应用不广,主要在航天、通信、导航、农业灌溉等领域作为补充能源。直到 70 年代,世界出现石油危机,地面大规模应用太阳能电池发电系统才被列上许多国家的议事日程。进入 20 世纪 80 年代,人口快速增长和工业化造成了 3 个全球性难题:能源短缺、生态破坏和环境污染。因为人类所使用的能源 80% 以上是由矿物燃料提供的^[5],其中煤炭占 28%,石油超过 40%。人类每年要燃烧 40 亿吨煤、25 亿吨石油,并以每年大约 3% 的速度增长。矿物燃料燃烧排放的是温室气体和有毒物质,它们使地球的生态环境急剧恶化,例如,煤炭、石油燃烧排放的是二氧化碳,仅 2004 年二氧化碳的排放量就达到 275 亿吨,并且每年都在不断增加。二氧化碳等气体的排放带来的直接后果就是温室效应,引起气候异常变化带来的环境灾难。另外,矿物燃料的燃烧每年向大气释放的二氧化碳、二氧化硫以及氮氧化物等有害气体,是造成温室效应和酸雨的主要因素^[6]。用煤发 1 度电需燃烧约 0.4kg 标准煤(1kg 原煤 = 0.7143kg 标准煤),排放 0.272kg 粉尘、0.997kg 二氧化碳和 0.03kg 二氧化硫,换句话说,这 1 度电如果用太阳能发电就可以少放出 0.272kg 粉尘、0.997kg 二氧化碳和 0.03kg 二氧化硫。

人们认识到,常规能源不仅数量有限,而且使用时对环境的污染和生态平衡的破坏日益严重,威胁人类的正常发展。人类要生存下去,现代文明要持续地发展下去,必须寻找一条可持续发展的清洁的能源道路。1997 年,150 多个国家签署了《京都议定书》,要求世界各国改变能源利用方式,从煤和石油逐渐转变为可再生能源,减少温室气体的排放,希望彻底解决人类社会发展与能源短缺、环境污染之间的矛盾。但是,因为担心影响工业生产和人们的生活水平,主要温室气体排放国没有签署《京都协定书》,所以,限制人类对能源的消耗达到环境保护目的的方法,与人类提高生产和生活水平的愿望矛盾,因而很难达到。

我国是《京都议定书》的签字国,我国二氧化硫排放量居世界第一位,二氧化碳排放量居世界第一位。从 2012 年开始,我国将面临越来越大的减排义务和国际压力。同时,对我国人民来讲,也只有减排温室气体,才能逐步改善生存环境,这都要求我国大力发展可再生能源。自 1980 年以来,中国的能源总消耗量每年增长约 5%,是世界平均增长率的近 3 倍,目前的能源储量与未来发展需求之间存在着巨大的缺口,而这个缺口也将越来越





大。专家预测,到2020年,中国石油消费量将达到4亿5000万吨至6亿1000万吨,而国内可供应的却只有1亿8000万吨至2亿吨,缺口达2亿5000万吨至4亿3000万吨。由于中国石油产量不可能大幅增长,今后新增的石油需求量几乎要全部依靠进口,到2020年前后,我国的石油进口量有可能超过3亿吨,成为世界第一大油品进口国。作为稀缺资源,石油历来被视为战略物资,被世界各国所争夺。根据预测,2020年中国石油对外依存度将超过55%,使我国能源安全出现问题,天然气的进口依存度为25%~40%。而在2020年以后,中国国内能源供应缺口将进一步扩大。因此,国家《可再生能源中长期发展规划》(以下简称“规划”)提出在2020年将可再生能源占能源的总比重发展到15%,不过,《规划》并没有给太阳能提出很高的目标,到2020年,《规划》中要求的光伏发电量只有180万千瓦。这主要是因为太阳能的能量分布十分分散,并且制造太阳能设备需要比较高的能耗和碳排放量,这就需要降低太阳能材料的生产成本并提高其光电转换效率。

太阳能光伏发电具有无污染、资源的普遍性和不枯竭等优点,符合保护环境和可持续发展的要求。因此,全人类再次把目光集中到太阳能发电上,各国政府对此高度重视^[7~12],例如,美国政府1970年制定了一系列的建筑法规,1978年又将一些法规作为法律写进了国家能源法,硬性要求建筑必须与节能相结合,对购买太阳能系统的买主实行减免税收等优惠政策^[13],1997年又推出了“克林顿总统百万屋顶光伏计划”,计划到2010年要为100万美国家庭安装3~5kW的光伏屋顶,并公布了国家光伏计划和2020年~2030年的长期规划,新计划宏大且富有挑战性,美国将其与阿波罗登月计划相媲美,决心使光伏技术像其他能源技术一样发展,使太阳能电池板安装在每一个房屋上。

德国的政策核心是优惠贷款、津贴以及对可再生能源生产者给予较高标准的固定补贴。1990年制定的《电力输送法》规定中型到大型电力用户按居民电价的90%支付风能、太阳能、水力以及生物质能生产的电力。投资可再生能源的企业,国家还以低于市场利率1~2个百分点的优惠利率,提供相当于设备投资成本75%的优惠贷款。德国从1999年起推行“10万屋顶”计划,准备在6年中资助10万户家庭装备太阳能电池设备,计划的主要手段是由商业银行向消费者直接提供优惠贷款。

荷兰政府提供一系列财政、税收和金融优惠,促进可再生能源的开发利用,主要有加速企业折旧、税收抵扣、对可再生能源项目提供低于市场利率的优惠贷款,以及对利用可再生能源等有利于保环的家庭给予低息贷款等;对按国家要求购买了新能源电力的电力工地,采取按比例分配的方式将新能源电力销售给有关用户,以收回因此投入的燃料和设备成本;对制造了污染但无法再循环利用的企业,征收能源税;建立绿色定价计划,消费者可以在购买可再生能源电力时,得到奖励性津贴;制定以可再生能源为基础的电力国家标准,以支持企业的市场化努力。

英国和上述几个国家不同,它通过一种称为“非化石燃料义务”的政策手段,来促进可再生能源的发展。在“非化石燃料义务”政策框架内,电力供应商必须购买一定量的非化石能源电力。

日本开发的重点是太阳能电池和风能,比较突出的项目是1997年之前推行的“万户屋顶”计划。该计划是通过电力消耗征收附加税的方式筹资,对所有装备太阳能设备的家庭,给予相当于设备成本1/3的津贴,同时,电力部门承诺以市场价格回购太阳能装置生产的超出家庭消耗需求的电力。1997年通过的新能源法,其主要政策手段是政府动员各大能源供应商积极购买通过可再生能源方式生产的电力。电力公司要对利用可再生能源设备生产的电力支付零售电价,购电合同期为15年,合同期内购电价水平依市场电价随时调整^[14]。





俄罗斯、印度、韩国、墨西哥、沙特、澳大利亚等国家都投入大量资金发展自己的光伏产业；希腊、日本、韩国、意大利、挪威、奥地利、西班牙、瑞典 8 国签订了合作项目，以期大规模利用太阳能发电。1996 年，联合国召开“世界太阳能高峰会议”，再次要求全球共同行动，广泛利用太阳能，会中发表了一系列重要文件，表明了联合国和世界各国对开发太阳能的坚定决心。欧盟会议推出“可再生能源白皮书”，要求大力生产光伏电池^[15~18]。从 1999 年开始，光伏产业快速发展，最近十年中，光伏组件的产量增长近 10 倍，而价格下降了 3/4，近 5 年世界光伏产品的年平均增长率更是超过 30%。据美国世界观察研究所的报告预测，未来光伏产业将与资讯、通信产业一起，成为全球发展最快的产业。到 21 世纪中叶，光伏发电量将占世界总发电量的 1/5，太阳能将成为常规能源的重要替代者^[19]。另外，生产规模的扩大与产品的价格成反比。随着太阳电池制作成本的降低和生产能力的提高，进一步降低成本的潜力使其完全有可能成为替代能源。表 1-1、表 1-2、表 1-3 分别列出 2001—2007 年世界各类太阳电池产量/MW、2000—2009 年中国太阳电池产量和安装量和 2004—2020 年部分国家和地区的光伏发电装机预测/GWp。

表 1-1 2001—2007 年世界各类太阳电池产量/MW^[22]

年 份	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
单晶硅电池	133	183	237	409	672	1141	1651
多晶硅电池	205.1	323.8	467	727	1013.9	1229.7	1999
薄膜电池	36	30	43	65	107	191	350
总计	374.1	536.8	747	1201	1792.9	2561.7	4000

表 1-2 2000—2009 年中国太阳电池产量和安装量^[22]

年度	太阳电池年产量/MW			年安装量/MW	累计安装量/MW
	非晶硅产量	晶体硅产量	年总产量		
2000	0.6	2.2	2.8	3.3	19
2001	0.3	4	4.3	4.5	23.5
2002	2	4	6	20.3	45
2003	2	10	12	10	55
2004	5	45	50	10	65
2005	12	133	145.7	5	70
2006	12	426	438	10	80
2007	28.3	1059.7	1088	20	100
2008	—	—	2000	40	140
2009	—	—	2800	160	300

表 1-3 2004—2020 年部分国家和地区的光伏发电装机预测/GWp^[22]

年 份	2004	2010	2020
日本	1.2	4.7	30
欧洲	1.2	6.7	41
美国	0.34	4.6	36
中国	0.065	0.35	1.8
其他	1.195	3.65	91.2
合计	4	20	200



我国能源的紧缺现状有目共睹,能源紧缺已成为我国经济持续快速发展的瓶颈,随着我国经济的高速发展,能源消耗还将有大幅度的增加。考虑到环境保护的目标,大力发展可再生能源是最佳选择。我国太阳能资源极为丰富,陆地表面接收的太阳辐射能约为每年 $50 \times 10^{18} \text{ kJ}$,年辐射总量达到 $335 \sim 837 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。从全国太阳能年辐射总量的分布(如图 1.6 所示)来看,西藏、青海、新疆、内蒙古南部、山西、陕西北部、河北、山东、辽宁、吉林西部、云南中部和西南部、广东东南部、福建东南部、海南岛东部和西部以及台湾省的西南部等广大地区的太阳辐射总量很大,全国 $2/3$ 国土年平均日照 2000 小时以上,仅 84 万平方千米的沙漠就有太阳能 8400 亿千瓦,是可再生能源中数量最大的,尤其是青藏高原地区最大,那里平均海拔在 4000m 以上,大气层薄而清洁,透明度好,纬度低,日照时间长,例如,被人们称为日光城的拉萨市 1961—1970 年年平均日照时间为 3005.7 小时,年平均晴天为 108.5 天,太阳总辐射为 816 kJ 。^① 另外一方面,我国仍然有交通不方便的边远山区的供电问题得不到解决,因为长途供应成本太高,而太阳能发电主要用在独立用户系统,所以,这为我国太阳电池的发展应用提供了优越的条件和巨大的市场。2006 年是我国实施“中华人民共和国可再生能源法”的第一年,这为我国可再生能源的发展提供了法律的保证,也为我国太阳电池的发展提供了良好的发展机遇。2009 年,我国政府有关部门又下发了关于太阳电池应用特别是在建筑一体化方面的具体补贴政策,补贴额度超过光伏发电成本的近一半,大大推进了光伏发电的普及。

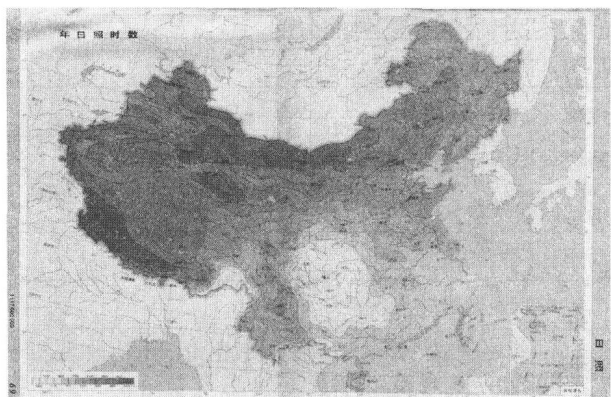


图 1.6 我国太阳能平均日照分布

太阳能发电的原理,即光伏效应,是 1839 年法国的 Becquerel 第一次在化学电池中观察到的^[20]。1887 年,第一个太阳电池问世,其转换效率 $1\% \sim 2\%$;硅光电池出现于 1941 年,1876 年,在固态硒(Se)的系统中也观察到了光伏效应。1954 年,贝尔实验室 Chapin 等人开发出效率为 6% 的单晶硅光电池,硅太阳电池于 1958 年首先在航天器上得到应用。在随后的 10 多年里,硅太阳电池在空间应用中不断扩大,工艺不断改进,电池设计逐步定型。20 世纪 70 年代初,许多新技术引入到电池制造工艺,转换效率有了很大提高。与此同时,硅太阳电池开始了地面应用,20 世纪 70 年代末,地面太阳电池产量已经超过了空间电池产量,促使成本不断降低。20 世纪 80 年代初,硅太阳电池进入快速发展时期,技术进步和研究开

① 感谢河南省气象局提供资料

发使太阳能电池的效率进一步提高,商业化生产成本持续降低,应用不断扩大。

从电池效率的发展划分,从1954年贝尔实验室 Chapin 等人开发出效率为6%的单晶硅太阳电池到1960年为第一个发展阶段,导致效率提升的主要技术是硅材料的制备工艺日趋完善、硅材料的质量不断提高,这一阶段电池效率为15%。1972年到1985年是第二个发展阶段,背电场电池(BSF)技术、“浅结”结构、绒面技术、密栅金属化是这一阶段的代表技术,电池效率提高到17%,电池成本大幅度下降。1985年后是电池发展的第三个阶段,各种各样的电池新技术和材料的出现,改进了电池性能,提高了其光电转换效率,例如表面与体钝化技术、Al/P 吸杂技术、选择性发射区技术、双层减反射膜技术等。目前相当多的技术、材料和设备正在逐渐突破实验室的限制而应用到产业化生产中,高效太阳电池的概念也已经提出。太阳电池发展简况见表1-4。

表 1-4 太阳电池发展简况

时 间	主 要 事 件
1839	A. E. Becqueral 发现光伏现象
1887	第一个太阳电池问世(转换效率1%~2%)
1941	第一个单晶硅太阳电池问世
1954	太阳电池转换效率达到6%
1955	太阳电池开始商业运用
1958	太阳电池开始用于太空
1970	太阳电池开始地面应用
1984	首个薄膜太阳电池出现(非晶硅薄膜)
1985	太阳电池转换效率超过20%
1986	首个商用薄膜太阳电池应用
1990	太阳电池产业开始高速发展
1991	瑞士 Gratzel 教授研制的纳米 TiO_2 染料敏化太阳电池效率达到7%
1998	多晶硅太阳电池产量首次超过单晶硅太阳电池
1999	美国 NREL 的 M. A. Contreras 等报道铜铟锡(CIS)太阳电池效率达到18.8%
2000	WuX., DhereR. G., AibinD. S. 等报道碲化镉(CdTe)太阳电池效率达到16.4%
2002	多晶硅太阳电池售价约为\$ 2.2/W
2003	德国 FraunhoferISE 的 LFC(Laserfired-Contact)晶体硅太阳电池效率达到20%
2004	德国 FraunhoferISE 多晶硅太阳电池效率达到20.3%
2006	世界第三代 CIGS 太阳能薄膜电池组件产能为17.5MW
2007	世界第三代 CIGS 太阳能薄膜电池组件产能为60.5MW
2008	中国引进首条 CIGS 太阳电池组件商业化生产线
2009	中国太阳电池产量达到4382MW,超过全球产量的40%

总之,由于太阳能发电具有充分的清洁性、绝对的安全性、资源的相对广泛性和充足





性、长寿命以及易于维护等其他常规能源所不具备的优点,光伏能源被认为是 21 世纪最重要的新能源,光伏发电为解决人类能源危机和环境问题具有重要的意义。

习 题

一、填空题

- (1) _____是地球上一切能源的来源。
- (2) 地面接收到的太阳辐射包括_____和_____。
- (3) 太阳能可以转换的能量形式的主要种类有_____、_____、_____和电能等。

二、问答题

- (1) 简述世界各国在推广太阳光伏发电过程中采取的主要措施。
- (2) 简述太阳电池的几个主要发展阶段。

本章参考文献

- [1] 耿新华. 南开大学稳步推进非晶硅太阳电池产业化[J]. 天津科技, 2001, (3): 29.
- [2] 李海雁, 杨锡震. 太阳电池[J]. 大学物理, 2003, 22(9).
- [3] 李仲明. 极富发展前景的多晶硅薄膜太阳电池[J]. 新材料产业, 2003, (7): 14-16.
- [4] Lodhi M A K. Energy Converse[J]. Mgmt, 1997, 38(18): 1881.
- [5] M. Cudzinovic, B. Sopori. Control of Back Surface Reflectance from aluminum alloyed contacts on silicon solar cells[C]. Proceedings 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, May 1996.
- [6] Joong Hyun Park, Do Young Kim, Jae Kyung Ko, et al. High temperature crystallized poly-Si on Mo substrates for TFT application[J]. Thin Solid Films, 2003, 427: 303-308.
- [7] 薛钰芝, 张力, 林纪宁. 太阳能光伏技术的研究与发展[J]. 大连铁道学院学报, 2003, 24(4): 71-74.
- [8] 中国资源综合利用协会可再生能源专业委员会. 中国光伏发电的技术现状及展望[J]. 可再生能源, 2002, 103(3): 5-8.
- [9] 蒋荣华, 肖顺珍. 硅基太阳电池与材料[J]. 新材料产业, 2003, 116(7): 8-13.
- [10] 梁宗存, 沈辉, 李戡洪. 太阳电池研究进展[J]. 能源工程, 2000, 4: 8-11.
- [11] 毛爱华. 太阳电池研究和发展现状[J]. 包头钢铁学院学报, 2002, 21(1): 94-98.
- [12] 王文采. 太阳电池[J]. 现代物理知识, 2000, 90(6): 3-6.
- [13] 王长贵. 世界光伏发电技术现状与发展趋势[J]. 新能源, 2000, 22(1): 44.
- [14] 张扬, 高辉. 太阳能利用与环境可持续发展是统一框架下的系统工程——美洲百万太阳能屋顶计划启示, 新能源[J]. 2000, 22(9): 51.
- [15] 王强, 夏朝凤. 浅析太阳能光伏技术的发展[J]. 新能源, 2000, 22(2): 44.
- [16] 杨维菊. 美国太阳能热利用考察及思考[J]. 世界建筑. 2003, (8): 83-85.
- [17] 新绿色电源——太阳电池[J]. 世界电子元器件, 2001, 4: 38-40.
- [18] P. Migliorato, in H. E. Maes, R. P. Mertens, R. J. Van Overstraeten (eds), Eur. Solid State Device Research Conf., Leuven 14-17 Sept. 1992, Elsevier, Amsterdam, 1992, 89.
- [19] I. Sakata, F. Aratani, K. Ishiyama, et al. PV Roadmap Toward 2030 in Japan. 15th PVSEC p31, 2005.
- [20] 赵玉文. 太阳电池新进展[J]. 物理, 2004, 33(2): 99-105.
- [21] 梁宗存, 沈辉, 李戡洪, 等. 太阳电池及材料研究[J]. 材料导论, 2000, 8(14): 38-40.
- [22] 中国光伏产业发展研究报告.



第2章

太阳电池原理

太阳光是可以发电的,那么,太阳光是怎样发电的?为什么半导体材料具有这种奇异性质?太阳能光伏发电具有什么优点?太阳电池是怎么分类的?这些问题都可以在本章找到答案。

2.1 光伏效应

利用光伏效应直接将光能转换成电能的电池称为太阳电池。所谓光伏效应,是用适当波长的光照射到半导体上时,系统吸收光能后两端产生电动势的现象。

2.1.1 半导体简介

为了说明光伏效应这一概念,本节从半导体说起。固体材料按照导电性能,可分为绝缘体、导体和半导体。通俗地讲,能够导电的称为导体,不能导电的称为绝缘体,介于导体与绝缘体之间的称为半导体。

固体材料是由原子组成的,原子是由原子核及其周围的电子构成的,一些电子脱离原子核的束缚,能够自由运动时,称为自由电子。金属之所以容易导电,是因为在金属体内有大量能够自由运动的电子,在电场的作用下,这些电子有规则地沿着电场的相反方向流动,形成了电流。自由电子的数量越多,或者它们在电场的作用下规则流动的平均速度越高,电流就越大,这种运载电量的粒子称为载流子。在常温下,绝缘体内仅有极少量的自由电子,因此对外不呈现导电性。半导体内有少量的自由电子,在一些特定条件下才能导电。半导体的导电能力介于导体与绝缘体之间。

从能带的角度解释,半导体的导电性介于导体和绝缘体之间的原因在于半导体能带的带隙。自由空间的电子所能得到的能量值基本上是连续的,但在半导体中,由于量子效应,孤立原子中的电子占据非常固定的一组分立的能线,当孤立原子相互靠近时,由于各原子的核外电子相互作用,本来在孤立原子状态时分离的能级扩展,相互重叠,变成带状,称为能带。

0K(开氏温度)时电子在能带中所占据的最高能级称为费米能级。能带中电子按能量从高到低的顺序依次占据能级。与最外层价电子能级对应的能带称为价带。价带上方是未被电子占据的空能带。价电子到达该空能带后将能参与导电,该空能带又称为导带。能带被价带占据的方式决定了介质的导电性能。导体中存在部分被电子占据、能参与导电的导