



# 光伏发电 原理与实践

主 编 尤 源

副主编 唐 健 朱成云 刘 艳 赵 杰 丁基勇



科学出版社

# 光伏发电原理与实践

主编 尤 源

副主编 唐 健 朱成云 刘 艳 赵 杰 丁基勇

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

随着电气与光电技术的飞跃发展,太阳能光伏发电技术正越来越广泛地受到设计师和工程技术人员的关注和重视。

本书共8章,包含光伏发电技术基础理论和光伏发电实验实训内容:太阳能电池的基本原理和分类、太阳能电池工艺及检测、太阳能电池组件及聚光电池、太阳能光伏发电系统、蓄电池、控制器、光伏逆变器、太阳能光伏发电应用及工程实例。每章均配有习题和光伏发电基础实验、综合性实验、设计性实验或实训项目等内容。

本书主要作为光伏发电相关专业的本科和高职学生教学用书,也可作为光伏发电工程师进行培训和学习的教材或参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

光伏发电原理与实践/尤源主编. —北京:科学出版社,2014.10  
ISBN 978-7-03-042014-5

I. ①光… II. ①尤… III. ①太阳能发电-研究 IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第224307号

责任编辑:范运年 / 责任校对:胡小洁  
责任印制:肖 兴 / 封面设计:无极书装



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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2014年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年9月第一次印刷 印张:16 1/4

字数:366 000

定价:38.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

随着电气与光电技术的飞跃发展,光伏发电技术正越来越广泛地受到设计师和工程技术人员的关注和重视。光伏发电技术是一门综合性交叉学科,与很多学科相互渗透、结合,是自然科学和工程学的结合,其理论基础宽广,工程实践综合性强。

本书旨在让初学者对光伏发电技术有一个总体认识,内容从实际工程需要出发,结合了光电专业的特点,覆盖面广,叙述由浅入深,图文并茂,浅显易懂,具有较强的实用性和可选性。本书共 8 章,包含光伏发电技术基础理论和光伏发电实验实训内容,即太阳能电池的基本原理和分类、太阳能电池工艺及检测、太阳能电池组件及聚光电池、太阳能光伏发电系统、蓄电池、控制器、光伏逆变器、太阳能光伏发电应用及工程实例,其中还包含 16 个光伏发电基础实验(验证性实验)、5 个综合性实验、6 个设计性实验、3 个实训项目,合计 30 个实验实训项目,这也是本书的特色与亮点。

本书主要作为高等院校以及高职光伏发电相关专业学生的教学用书,也可作为电气、电子、光电工程技术人员进行光伏发电技术培训和学习的教材或参考书。

本书作为教材的特色如下:

(1) 建议本书的教学课程设置在 50~80 学时。

(2) 本书知识全面,基础理论部分层次性强,条理清楚,内容由浅入深,无过多的理论推导与分析,适于入门教学。

(3) 本书工程性强,对光伏发电相关技术进行了精选,并融入了一些专业前沿最新发展动向和作者的部分研究成果。

(4) 本书设置了 4 个系列教学实验,从基础实验到综合性实验、设计性实验以及实训项目,内容涵盖面广,让学生能够通过光伏发电应用实例分析和实践动手性很强的教学实验,直观而有效地掌握光伏发电技术的基础理论知识,提高工程实践能力。

本书由尤源主笔,唐健、朱成云、刘艳、赵杰、丁基勇、刘成林、陈杰、夏道澄、鲍安平、张文建、盛冬、王勇军、张猛、毛明军、徐正来、谢军、孙永旺等参加了编写工作。本书在编写过程中得到了江苏伟创晶集团的大力支持,在此表示由衷感谢。

由于时间仓促、水平有限,书中难免有不当和漏误之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2014 年 6 月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 太阳能电池的基本原理和分类</b> .....	1
1.1 绪论 .....	1
1.2 太阳能电池的基本原理 .....	3
1.2.1 太阳能电池的物理原理 .....	4
1.2.2 太阳能电池的伏安特性 .....	5
1.2.3 寄生电阻的影响 .....	7
1.2.4 光学损失和复合损失 .....	8
1.3 太阳常数和大气质量 .....	10
1.4 晶硅太阳能电池的种类和技术发展 .....	11
习题 .....	15
验证性实验项目 .....	15
实验一 太阳能电池板伏安特性测试实验 .....	15
实验二 环境对光伏转换影响实验 .....	19
<b>第 2 章 太阳能电池工艺及检测</b> .....	22
2.1 太阳能电池实验室制备 .....	22
2.1.1 磁控溅射镀膜 .....	22
2.1.2 真空蒸发镀膜 .....	25
2.2 太阳能电池产业化简介 .....	26
2.2.1 单晶硅太阳能电池 .....	26
2.2.2 多晶硅太阳能电池 .....	28
2.2.3 硅带太阳能电池 .....	29
2.3 太阳能电池的性能测试 .....	31
2.3.1 X 射线衍射 .....	31
2.3.2 扫描电子显微镜 .....	31
2.3.3 X 射线光电子能谱 .....	32
2.3.4 光致荧光发光谱 .....	33
2.3.5 紫外—可见光分光光度计测量薄膜透光率 .....	34
2.3.6 四探针及霍尔效应测试薄膜电学性能 .....	34
2.3.7 电化学 C-V .....	35
2.3.8 太阳能电池光谱测试系统 .....	36
习题 .....	37
验证性实验项目 .....	37

实验三 太阳能电池板的暗伏安特性测试实验 .....	37
实验四 太阳能电池光谱特性测试实验 .....	41
<b>第 3 章 太阳能电池组件及聚光电池 .....</b>	<b>45</b>
3.1 太阳能电池组件 .....	45
3.2 聚光太阳能电池 .....	48
3.2.1 聚光电池的基本原理 .....	48
3.2.2 聚光电池的技术参数 .....	48
3.2.3 聚光器的总类 .....	49
3.2.4 砷化镓(GaAs)电池 .....	50
3.3 太阳能聚光系统的引入 .....	52
3.3.1 追光系统概述 .....	52
3.3.2 跟踪装置 .....	55
3.3.3 四象限闭环控制系统原理 .....	56
3.3.4 开环及闭、开环相结合的追光系统原理 .....	58
习题 .....	64
验证性实验项目 .....	64
实验五 太阳能可变阻抗负载实验 .....	64
实验六 聚光太阳能能量转换实验 .....	66
综合性实验项目 .....	69
实验七 太阳能电池板逐日系统综合实验 .....	69
设计性实验项目 .....	75
实验八 直流步进电机型云台自动追光电路的设计 .....	75
实训项目 .....	80
实验九 交流 24V 电机双轴云台自动追光电路的设计与制作 .....	80
<b>第 4 章 太阳能光伏发电系统 .....</b>	<b>86</b>
4.1 太阳能光伏发电系统的工作原理 .....	86
4.2 太阳能光伏发电系统的分类 .....	86
4.3 独立太阳能光伏发电系统 .....	89
4.4 太阳能光伏并网系统 .....	91
4.4.1 太阳能光伏并网系统组成 .....	91
4.4.2 光伏并网系统逆变器要求 .....	92
4.4.3 光伏并网系统的拓扑结构 .....	93
4.5 智能微网 .....	93
4.5.1 智能微网的概念 .....	93
4.5.2 智能微网的优点 .....	93
4.5.3 智能微网运行方式 .....	94
4.5.4 智能微网关键技术 .....	95
习题 .....	96

验证性实验项目 .....	96
实验十 太阳能光伏板能量转换实验 .....	96
实验十一 太阳能负载最大输出实验 .....	100
综合性实验项目 .....	103
实验十二 太阳能光伏并网发电系统综合实验 .....	103
设计性实验项目 .....	106
实验十三 小功率光伏发电并网系统的设计 .....	106
<b>第 5 章 蓄电池</b> .....	<b>110</b>
5.1 蓄电池概述 .....	110
5.2 蓄电池的基本概念 .....	111
5.2.1 蓄电池的分类 .....	111
5.2.2 蓄电池的电压 .....	111
5.2.3 蓄电池的容量 .....	111
5.3 铅酸蓄电池 .....	113
5.3.1 铅酸蓄电池的结构 .....	113
5.3.2 铅酸蓄电池的工作原理 .....	114
5.3.3 铅酸蓄电池的充放电特性 .....	116
5.4 VRLA 蓄电池 .....	117
5.4.1 VRLA 电池的结构 .....	117
5.4.2 VRLA 蓄电池的工作原理 .....	118
5.4.3 VRLA 蓄电池的密封原理 .....	118
5.4.4 VRLA 电池的两大类技术——AGM 电池和胶体电池 .....	119
5.4.5 VRLA 蓄电池的技术特性 .....	120
5.5 锂电池 .....	122
5.5.1 锂电池的结构 .....	122
5.5.2 锂电池的工作原理 .....	123
5.5.3 锂电池的特点 .....	123
5.5.4 锂电池的使用注意事项 .....	124
5.6 蓄电池的使用和维护 .....	124
5.6.1 蓄电池与控制器的连接与安装蓄电池的注意事项 .....	124
5.6.2 充电注意事项 .....	124
5.6.3 日常的维护 .....	125
习题 .....	125
验证性实验项目 .....	125
实验十四 太阳能电池组件和蓄电池的选择 .....	125
实验十五 太阳能蓄电池性能测试实验 .....	127
<b>第 6 章 控制器</b> .....	<b>132</b>
6.1 控制器的基本工作原理 .....	132

6.2	控制器的功能 .....	133
6.3	控制器的分类 .....	133
6.3.1	并联型控制器 .....	133
6.3.2	串联型控制器 .....	134
6.3.3	脉宽调制型控制器 .....	135
6.3.4	多路控制型控制器 .....	136
6.3.5	最大功率跟踪型控制器 .....	136
6.4	光伏控制器的选用 .....	137
6.4.1	光伏控制器的主要技术参数 .....	137
6.4.2	光伏控制器的主要性能特点 .....	139
6.4.3	光伏控制器的配置选型 .....	141
	习题 .....	141
	验证性实验项目 .....	142
	实验十六 太阳能电池控制器工作原理实验 .....	142
	实验十七 太阳能电池控制器充放电保护实验 .....	145
	综合性实验项目 .....	149
	实验十八 触摸屏技术在光伏发电监控中应用综合实验 .....	149
	实训项目 .....	155
	实验十九 太阳能光伏控制器设计与制作 .....	155
<b>第7章</b>	<b>光伏逆变器</b> .....	162
7.1	逆变器电路拓扑结构 .....	162
7.1.1	单相电压型逆变器 .....	162
7.1.2	电压型三相逆变电路 .....	164
7.2	逆变器的 PWM 控制 .....	167
7.2.1	PWM 控制的基本原理 .....	167
7.2.2	PWM 逆变电路的控制方式 .....	168
7.2.3	PWM 产生方法 .....	169
	习题 .....	171
	验证性实验项目 .....	171
	实验二十 太阳能光伏逆变器工作原理分析实验 .....	171
	实验二十一 太阳能光伏逆变器性能测试实验 .....	175
	设计性实验项目 .....	177
	实验二十二 单相并网型光伏逆变器的设计 .....	177
	实训项目 .....	180
	实验二十三 太阳能发电系统逆变器设计及制作 .....	180
<b>第8章</b>	<b>太阳能光伏发电应用及工程实例</b> .....	185
8.1	太阳能光伏技术在照明领域的应用 .....	185
8.1.1	太阳能路灯结构组成 .....	185



8.1.2 太阳能路灯工作原理 .....	186
8.2 太阳能光伏技术在通信领域的应用 .....	187
8.3 太阳能光伏技术在光伏发电领域的应用 .....	188
8.3.1 大型光伏发电系统(电站) .....	188
8.3.2 小型光伏发电系统 .....	189
8.4 太阳能光伏技术在交通领域的应用 .....	189
8.4.1 太阳能汽车和太阳能电动车 .....	189
8.4.2 太阳能游船 .....	192
8.4.3 太阳能飞机 .....	192
8.5 太阳能光伏技术在建筑领域的应用 .....	193
8.5.1 太阳能光伏建筑一体化 .....	193
8.5.2 太阳能光电幕墙 .....	195
8.5.3 光伏建筑一体化系统设计 .....	196
8.5.4 光伏建筑一体化建筑设计 .....	199
8.5.5 光伏建筑一体化光伏系统的安装与调试 .....	204
8.6 太阳能光伏技术在农业领域中的应用 .....	205
8.6.1 光伏农业概述 .....	205
8.6.2 太阳能发电在植物补光中的具体应用 .....	207
8.7 太阳能光伏技术在太空领域中的应用 .....	209
8.8 太阳能光伏技术在其他领域中的应用 .....	210
8.9 光伏发电系统工程实例 .....	211
8.9.1 10kW 光伏发电系统工程设计 .....	211
8.9.2 家庭用光伏发电系统工程设计 .....	217
习题 .....	219
验证性实验项目 .....	220
实验二十四 不同负载对太阳能光伏逆变器的影响实验 .....	220
实验二十五 太阳能光伏控制器电磁兼容测试 .....	222
综合性实验项目 .....	226
实验二十六 独立光伏发电系统应用综合实验 .....	226
实验二十七 太阳能汽车应用综合实验 .....	230
设计性实验项目 .....	232
实验二十八 太阳能多功能电源充电器设计 .....	232
实验二十九 30W 太阳能 LED 路灯电路的设计 .....	236
实验三十 太阳能光伏发电系统的设计与制作 .....	242
参考文献 .....	246

# 第 1 章 太阳能电池的基本原理和分类

## 1.1 绪 论

1839 年法国实验物理学家 Edmund Becquerel 报道了他在电解槽中发现了光生伏特效应,自此以后,世界各国科学家对这一效应产生了浓厚的兴趣,并从理论和实验两方面对它展开了深入的研究。1877 年 Adams 和 Day 在固体硒中观察到了光生伏特效应,接着美国发明家 Fritts 于 1883 年描述了第一个由硒片制造的光伏电池。此后又有人陆续在氧化亚铜和硫化镉中发现了光生伏特效应。1941 年 Ohl 提出了基于 PN 结的单晶硅光伏器件的设想。在此基础上,美国贝尔(AT&T)实验室的三位科学家 Chapin、Fuller 和 Pearson 于 1954 年研制成功世界上第一个实用型单晶硅 PN 结太阳能电池,开始时电池转换效率只有 4.5%,几个月后,他们便把电池的效率提高到 6%,从此光伏技术的研究与应用进入了新的历史阶段。

1958 年,首颗以光伏电池作为信号系统电源的人造卫星——美国的先锋 I 号(Vanguard I)卫星发射上天,从此开始了光伏电池作为空间电源应用的新纪元。由于太阳能电池具有功率高、寿命长、可靠性好等优点,并能很好地在外太空极端恶劣的环境下工作,加之外太空的太阳辐射相对稳定,且不受地球大气层和气候变化的影响,使得太阳能电池作为一种较为理想的空間电源获得了广泛应用。在迄今人类发射到外太空中去的各类飞行器中,绝大部分使用太阳能电池作为电源。

1973 年世界爆发了第一次能源危机。这次能源危机使人们清醒地认识到地球上化石能源储藏及供给的有限性,客观上要求人们必须寻找其他可替代的能源,改变现有的以使用单一化石能源为基础的能源供给结构。为此,以美国为首的西方发达国家纷纷投入大量人力、物力和财力支持地面用光伏技术的研究和发展,并在全世界范围内掀起了开发利用太阳能的热潮,也由此拉开了太阳能电池走向地面应用的序幕。在此后短短的 20 年时间,越来越多的科学家投身于地面用光伏技术研究和应用的热潮中,就太阳能电池从材料、结构和工艺等各方面进行了广泛而深入的研究,在提高太阳能电池效率和降低成本等方面做出了不懈的努力。

1976 年,RCA 实验室的 Carlson 和 Wronski 发明了非晶硅薄膜太阳能电池。虽然当时小面积样品的光电转换效率只有 2.4%,但这种非晶硅薄膜太阳能电池却显示出成本低廉、可大面积制备、易于实现组件面积上的集成以及便于工业化大规模连续生产等巨大优势。经过多年的努力,美国在 20 世纪 80 年代中期率先实现了非晶硅薄膜太阳能电池的产业化,当时组件的初始效率为 5%~6%。1987 年,在非晶硅薄膜太阳能电池发展的鼎盛时期,它曾一度占据世界光伏组件销售量的 40%。虽然非晶硅薄膜太阳能电池后来因存在转换效率较低且效率随光照衰退明显等问题限制了它的发展,但它的出现使人们

更清楚地看到,未来廉价高效太阳能电池的发展方向在于太阳能电池的薄膜化,一旦薄膜太阳能电池在关键技术上取得重大突破,光伏发电是能够与传统的能源技术相竞争的。另一项重要的研究工作是由澳大利亚新南威尔士大学 Green 领导的研究小组在 1985 年做出的。他们通过多年深入细致地研究限制晶体硅太阳能电池效率提高的机理,找到了克服使太阳能电池效率降低的各种因素的办法,最终使单晶硅太阳能电池的效率突破了 20% 的大关。国际光伏产业也正是在这一时期孕育、萌芽、发展壮大起来的。经过多年的发展,到 1989 年已形成年产光伏组件 40MW、销售额近 4 亿美元的产业。由于当时太阳能电池组件的价格昂贵,用它来发电并向常规电网供电在经济上并不合算。这个时期光伏发电主要应用于一些特殊供电场合,譬如在交通、微波通信、农业灌溉、医疗卫生、石油工业、日用电子产品以及偏远无电地区用电等领域使用。

作为光伏发电在地面应用的示范,各国政府也出资建立了一些规模从几千瓦到几兆瓦的光伏电站。一些发明家甚至别出心裁造出了太阳能飞机及汽车等。1981 年首架以光伏为动力的太阳能飞机 Solar Challenger 试飞成功;在 1987 年举办的首届太阳能汽车穿越澳大利亚大奖赛“World Solar Challenge”中,来自通用汽车公司(GM)的 Sunrayce 以 71km/h 的平均时速跑完 950km。

鉴于全球能源短缺和环保问题的日趋严重,1992 年联合国在巴西的里约热内卢召开了世界环境和发展大会。在这次大会上,世界各国进一步认识到:工业革命虽然为人类社会创造了高度发达的物质文明,使人们充分享受到现代科技给生活带来的巨大舒适和便利,但支撑整个工业化社会存在和发展的能源基础却存在隐患,因为它是以大量消耗地球上有限的化石能源为基础的。而且,随着发展中国家向工业化社会的快速推进,世界人口的增加以及人们对能源消耗要求的不断增加,世界能源供给和需求的矛盾将会加剧。另一方面,大量燃烧化石能源排放出大量的废气、废水,给生态环境造成了极大的破坏。由此引发的全球气候变暖、气候异常、洪涝及酸雨等自然灾害正威胁着人类自身的生存。会后,世界各国达成了共识,即必须把经济和社会的发展与环境保护有机结合起来,走可持续化发展的道路,而经济和社会的可持续发展对能源利用的要求就是要大力开发利用可再生的洁净能源。

光伏发电自 20 世纪 70 年代开始在地面得到应用,到 90 年代后半期进入了快速发展时期。最近 10 年和最近 5 年太阳能电池的年平均增长率分别为 41.3% 和 49.5%。2007 年太阳能电池产量达到了 4000MW,总装机容量约为 10GW。特别是自 2004 年德国实施了经过修订的《上网电价法》以来,市场需求急剧扩大,光伏产品供不应求。尽管有材料短缺的限制,2007 年太阳能电池/组件产量的年增长率仍然达到 56.2%。另外,光伏发电领域中并网发电的比例也越来越大,正在逐步成为光伏发电市场应用的主导市场。2007 年欧洲的并网光伏系统比例达到 95% 以上,世界平均达到 80% 以上。自 2000 年以来,并网光伏发电的年平均增长率超过 60%,是整个可再生能源技术中相对增长最快的技术,图 1-1 给出了最近十几年中全球光伏产量的走势。

在所使用的各种太阳能电池中,晶体硅太阳能电池的市场占有率在最近几年都始终保持在 90% 左右,剩下的绝大部分市场份额也由非晶硅薄膜太阳能电池所占据,其他的薄膜太阳能电池的贡献微不足道。现阶段产业化光伏技术的最大赢家是多晶硅太阳能电

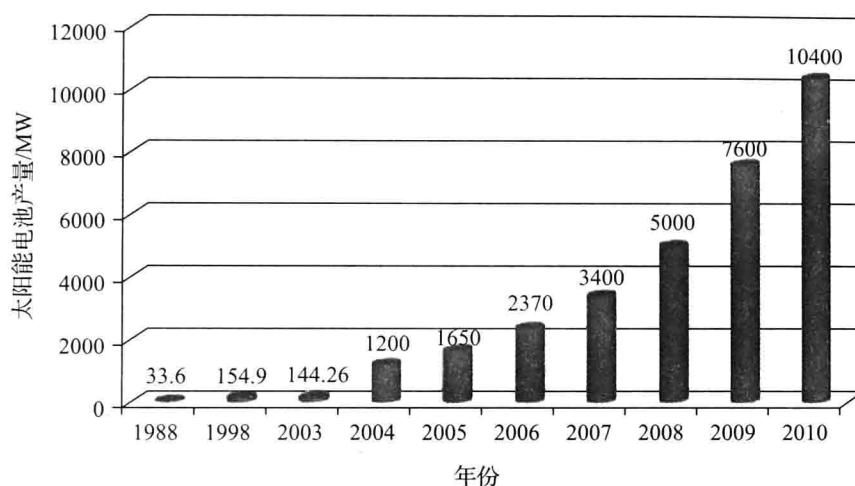


图 1-1 全球光伏产量走势

池技术,造成这一现象的主要原因是因为多晶硅太阳能电池具有比单晶硅太阳能电池更高的性价比。用来生产多晶硅片的多晶硅锭是采用铸锭法制造的,在降低成本方面有明显的优势。与昂贵的拉单晶过程相比,铸锭法使用的设备及制造过程简单,省时省电,节约硅材料,并可使用较低纯度的硅原料。此外,铸锭法可直接制备出大尺寸的方形硅锭,经切片后可获得理想的方形多晶硅片,而由此制作的方形太阳能电池片具有更高的组件填充密度,几乎能完全利用组件面积,进而弥补组件水平上多晶硅太阳能电池较单晶硅太阳能电池在效率上的劣势。更重要的是,近年来多晶硅太阳能电池的制备工艺及技术取得了重大突破,使得目前多晶硅太阳能电池的效率与单晶硅太阳能电池相当接近。

由以上分析不难看出,晶体硅太阳能电池主导国际光伏市场的格局在短期内不会改变,而且其所占的市场份额还会继续增加。但是,晶体硅太阳能电池技术的进一步发展仍然会受到成本降低极限的限制,难以实现最终与传统能源技术相竞争的目标。从长远来看,光伏技术要在未来世界能源体系中占据重要的位置,还需要在技术上特别是薄膜太阳能电池技术上取得重大的技术突破。

## 1.2 太阳能电池的基本原理

光电池是直接把光转变成电的光电器件,由于它是利用各种势垒的光生伏特效应制成的,故称为光生伏特电池,简称光电池。光电池按用途可以分为太阳能电池、测量光电池;按材料可以分为硅光电池、锗光电池、硒光电池、砷化镓光电池。其中最受重视的是硅光电池,硅光电池具有很多优点,如性能稳定、寿命长、光谱响应范围宽、频率特性好、能耐高温等。光电池可应用于光能转换、光度学、辐射测量、光学计量和测试、激光参数测量等方面。

随着世界范围能量需求的增加,矿物燃料等常规能源将在不远的时间内枯竭,必须发展和采用替代能源,特别是唯一的长期天然能源即太阳能。太阳能电池被认为是从太阳获取能量的主要候选者,因为它能以高的转换效率将太阳光直接转变为电能,能够以低运行成本提供几乎是永久性的电力,而且没有污染。最近,低成本平板太阳能电池、薄膜器件

和集光系统的研究和开发,以及许多富有革命性意义的概念不断被提出,相信在不久的将来,适应大规模生产和利用太阳能的小太阳能模块和太阳能电厂的建立在经济上是可行的。

1954年美国贝尔电话实验室制造出了第一个实用的硅太阳能电池。原则上讲,各种半导体材料都能用来制作太阳能电池,如硒、硅、碲化镉、砷化镓、磷化铟等。非晶硅太阳能电池作为一种低成本太阳能电池现在逐渐受到重视,世界各国都在大力研究。目前,有实用价值的主要是硅太阳能电池,其他材料和结构的太阳能电池尚处于研究阶段。

### 1.2.1 太阳能电池的物理原理

采用掺杂工艺,通过扩散作用,将P型半导体与N型半导体制作在同一块半导体基片上,在它们的交界面就形成空间电荷区,称为PN结。半导体光电池多数具有一个大面积的PN结,所以PN结的光生伏特效应是太阳能电池的理论基础。太阳能电池是不加偏置的PN结器件,光生伏特效应就是半导体材料吸收光能后在PN结上产生电动势的效应,如图1-2所示,图中 $E_F$ 为费米能级。光生伏特效应有3个主要物理过程:首先,吸收 $h\nu \geq E_g$ 的光子激发出非平衡电子空穴对,其中 $h\nu$ 表示入射光子复合能量, $h$ 为普朗克常量, $\nu$ 为频率, $E_g$ 为半导体带隙宽度;其次,非平衡电子和空穴从产生处向内建电场区运动,这种运动可以是扩散运动也可以是漂移运动;最后,非平衡电子和空穴在内建电场作用下向反方向运动而分离。这种电场区可以是PN结、金属与半导体间的肖特基势垒和异质结等。

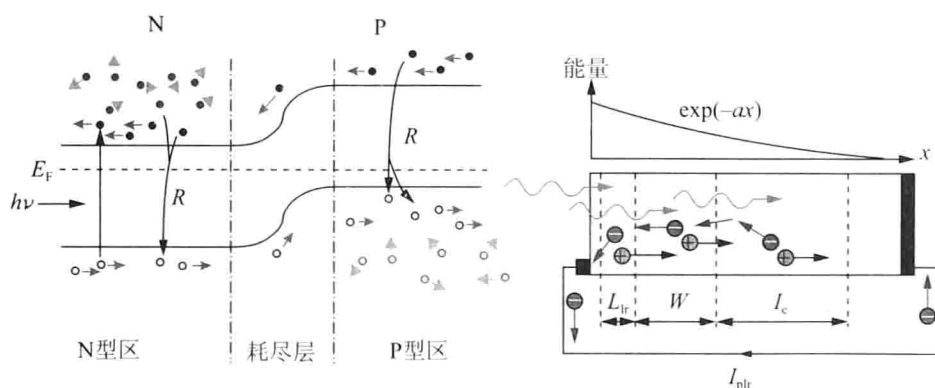


图 1-2 太阳能电池的物理原理

在光的照射下,如果光子能量大于禁带宽度,在PN结及其附近就可能产生电子空穴对。这些非平衡载流子只要能运动到PN结的边界,便马上被PN结强大的内建电场所分离。非平衡空穴被拉向P区,非平衡电子被拉向N区。结果在N区边界将积累非平衡电子,P区边界将积累非平衡空穴,产生一个与平衡PN结内建电场方向相反的光生电场;于是在P区和N区间建立了光生电动势。积累的光生载流子部分地补偿了平衡PN结的空间电荷,引起PN结势垒高度的降低,如图1-3所示,图中, $E_c$ 为导带, $E_v$ 为价带, $q$ 为电子电量。光照使PN结势垒降低等效于PN结外加正向偏压,同样能引起P区空穴和N区电子向对方的扩散,形成正向注入电流,这个电流的方向与光电流刚好相反。受光照的PN结如果处于开路状态,光生载流子只能积累于PN结两侧产生光生电动势。这时在电池外测得的电位差为开路电压,用 $U_{oc}$ 来表示。如果把PN结从外部短路,则

PN 结附近的光生载流子将通过这个途径流通,这时流过太阳能电池的电流叫短路电流,用  $I_{SC}$  表示。

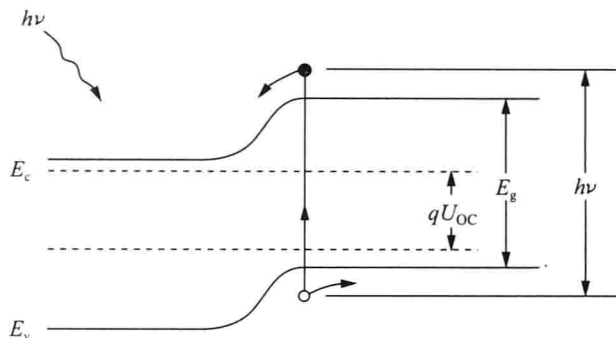


图 1-3 光照下 PN 结能带图

### 1.2.2 太阳能电池的伏安特性

在 PN 结内建电场  $E$  的作用下,电子受力向 N 型一侧移动,空穴受力向 P 型一侧移动。图 1-4 描述了在短路条件下载流子的理想流动情况, $e^-$  和  $h^+$  分别表示电子和空穴。总体来说,在离 PN 结越近的地方产生的电子空穴对越容易被收集。光照对太阳能电池的作用,可以认为是在原有的二极管暗电流基础上简单添加了一个电流增量,于是二极管公式为

$$I = I_0 (e^{\frac{qU}{nk_B T}} - 1) - I_L \quad (1-1)$$

式中,  $I_0$  为反向饱和电流;  $n$  为修正因子;  $k_B$  为玻尔兹曼常量;  $T$  为温度;  $q$  为电子电量;  $U$  为电压;  $I_L$  为光生电流增量。

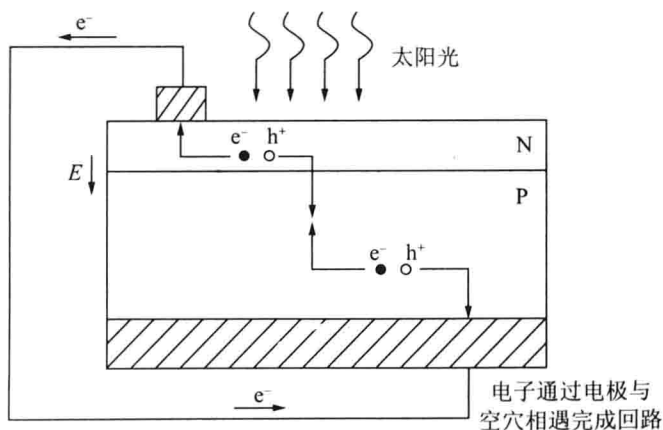


图 1-4 PN 结区域电子与空穴在理想短路情况下的流动

光照能使电池的伏安特性曲线向下平移至第四象限,于是二极管的电能不能被获取,如图 1-5 所示。

在一定光照强度、工作温度条件下,衡量太阳能电池电力输出有两个主要参数。

(1) 短路电流  $I_{SC}$ 。当电压为 0 时,电池输出的最大电流为  $I_m$ 。在理想情况下,如果  $U=0, I=I_L, I_L$  与入射光照强度成正比。晶硅电池的短路电流密度可表示为

$$J_{SC} = q \int_{\text{总}} G_L dx - q \int_p \frac{\Delta p}{\tau_p} dx - q \int_n \frac{\Delta n}{\tau_n} dx - q \int_{\text{耗尽区}} \xi dx - q \Delta p S_p - q \Delta n S_n \quad (1-2)$$

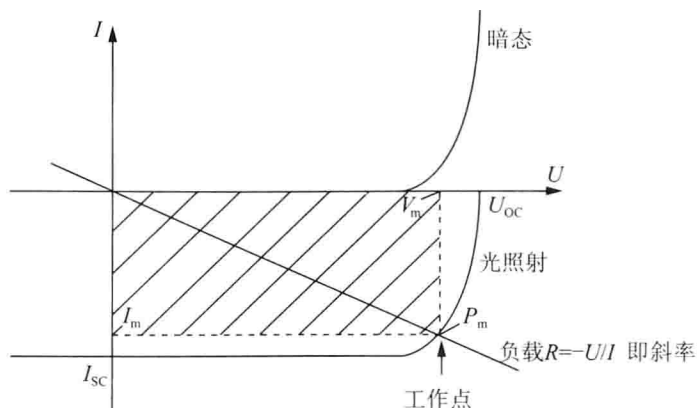


图 1-5 光照下太阳能电池伏安特性曲线

式中,  $G_L$  是光生载流子的产生率;  $\Delta n(\Delta p)$  为过剩载流子浓度;  $\tau_n(\tau_p)$  是电子(空穴)的少子寿命;  $\xi$  为耗尽层的复合率;  $S_p(S_n)$  为空穴(电子)的表面复合速率。

在式(1-2)中,第 1 项是晶硅吸收光产生电子空穴对的电流,后 5 项都是降低光电流密度的因素。第 2~4 项分别为在 P 区、N 区和耗尽区的体复合损失,最后两项表示的电流密度损失来自表面复合。该式清楚地表明,半导体中非平衡载流子寿命决定着太阳能电池中复合电流的大小。寿命长则使 N 区、P 区和耗尽区的复合电流都减小,从而使短路电流增加。式(1-2)还表明,表面复合速率的增大使短路电流减小。载流子寿命对短路电流的影响是容易理解的,因为光生载流子只有运动到 PN 结附近才能被结电场收集形成光生电流。这就要求少子扩散长度大于电子空穴对产生地点与 PN 结之间的距离。半导体材料的少子寿命短则扩散长度也短,能被结收集的范围也小了,这必将导致光生电流下降。

(2) 开路电压  $U_{oc}$ 。当电流为 0 时,电池输出的最大电压为  $U_m$ 。当  $I=0$  时

$$U_{oc} = \frac{nk_B T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \tag{1-3}$$

反向饱和电流  $I_0$  越小,光电流  $I_{sc} = I_L$  越大,则开路电压越大。对于伏安特性曲线上的每一点,都可取该点上电流与电压的乘积,以反映此工作情形下的输出电功率  $P$ ,即

$$P = IU = [I_0(e^{\frac{qU}{k_B T}} - 1) - I_L]U \tag{1-4}$$

太阳能电池的效能可以用“最大功率点”来描述,在最大功率点  $U_m \times I_m$  达到电流电压乘积函数的最大值。太阳能电池的最大输出功率  $P_m$  可以用图形方式表示,即在伏安特性曲线下描绘一个矩形,并使其面积最大。换言之,令

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(IU)}{dU} = 0 \tag{1-5}$$

从而

$$U_m = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{1 + \frac{I_L}{I_0}}{1 + \frac{qU_m}{k_B T}}\right) \approx U_{oc} - \frac{k_B T}{q} \ln\left(1 + \frac{qU_m}{k_B T}\right)$$

$$I_m = I_0 \left(\frac{qU_m}{k_B T}\right) e^{\frac{qU_m}{k_B T}} \approx I_L \left(1 - \frac{k_B T}{qU_m}\right) \tag{1-6}$$

$$P_m = I_m U_m = I_L \left[ U_{OC} - \frac{k_B T}{q} \ln \left( 1 + \frac{q U_m}{k_B T} \right) - \frac{k_B T}{q} \right]$$

填充因子(fill factor, FF)是衡量电池 PN 结质量及串联电阻的参数。它的定义是

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{OC} I_{SC}} \quad (1-7)$$

因此有

$$P_m = U_{OC} I_{SC} \cdot FF \quad (1-8)$$

很明显,FF 越接近 1,太阳能电池的质量就越好。

### 1.2.3 寄生电阻的影响

太阳能电池通常伴随有寄生串联电阻和并联(分流)电阻,如图 1-6 所示,两种寄生电阻都会导致 FF 降低。如果同时存在串联电阻  $R_s$  和并联电阻  $R_{sh}$ ,太阳能电池的伏安特性曲线由下式给出:

$$I = I_L - I_0 \left[ e^{\frac{q(U+IR_s)}{nk_n T}} - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1-9)$$

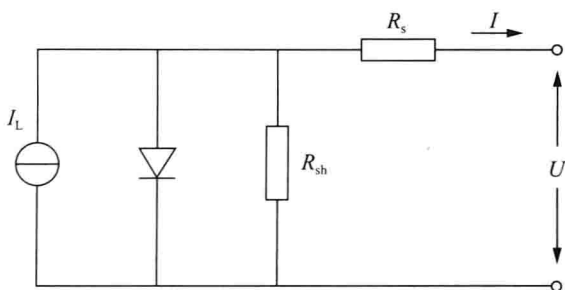


图 1-6 太阳能电池等效电路图

$R_s$  主要来源于半导体材料的体电阻、金属接触与互联、载流子在顶部扩散层的运输以及金属和半导体材料之间的接触电阻。根据式(1-9)可以得到串联电阻的影响,如图 1-7所示。为了减少发射区薄层电阻的影响,常常使用高掺杂发射区并作成较深的结。栅指状电极覆盖于太阳能电池受光表面,做成细而多的条,以减少挡光面积,而且还可以适当选择栅条间距和条数来减少光电流在流过发射区时产生的损耗(由于金属表面反射光,所以表面金属电极占据的面积越大,太阳能电池的效率越低。但是,当电极面积越小时,电流流动时的电阻变大,效率也会降低。从而,必须将电极宽度和电极间距设计成最佳值)。而并联电阻  $R_{sh}$  是由于 PN 结的非理想性和结附近的杂质造成的,它引起结的局部短路,尤其在电池边缘。根据式(1-9)可以得到并联电阻的影响,如图 1-8 所示。

由此可以得到结论:串联电阻不影响开路电压,却严重影响填充因子和短路电流;并联电阻不影响短路电流,但对开路电压和填充因子都有影响。从图 1-7、图 1-8 可以得到下述近似关系:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \left( \frac{dI}{dU} \right)_{I=0} \right| \approx \frac{1}{R_s} \\ \left| \left( \frac{dI}{dU} \right)_{U=0} \right| \approx \frac{1}{R_{sh}} \end{array} \right. \quad (1-10)$$



利用式(1-10)就可以从伏安特性曲线粗略地估计出  $R_s$  和  $R_{sh}$  的大小。

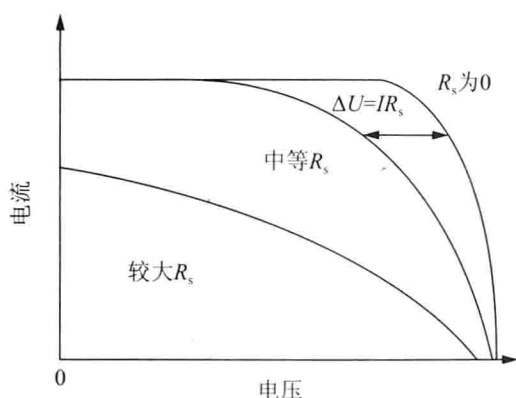


图 1-7 串联电阻对太阳能电池填充因子的影响

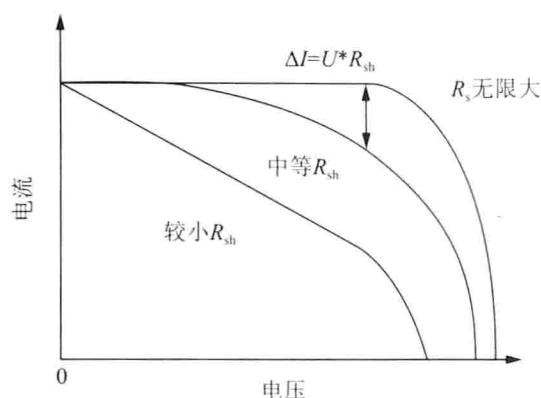


图 1-8 并联电阻对太阳能电池填充因子的影响

### 1.2.4 光学损失和复合损失

光学损失和复合损失会使电池功率输出低于理想值。

#### 1. 光学损失

太阳能电池的一些光学损失过程包括顶部金属电极的遮光、表面反射、背电极(背面接触)的反射等。

以下几种方法都可以减少光学损失。

(1) 将电池表面顶层的电极面积减少到最小(虽然这将导致串联电阻的增加)。

(2) 在电池表面使用减反射膜。它利用从膜表面与从电池基体表面反射的光发生光的相消而减少反射损失。根据光的干涉原理,设大气或真空折射率为  $n_0$ ,减反射膜厚度为  $h_1$ ,光波长为  $\lambda$ ,则减反射膜(介质)折射率  $n_1$  与半导体材料的折射率  $n_2$  之间满足如下关系:

$$\begin{cases} n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \\ n_1 h_1 = \frac{1}{4} \lambda \end{cases} \quad (1-11)$$

(3) 通过电池表面制绒可以有效减少反射。

(4) 随机式反射陷光(“陷光”指光被俘获)结构,无规则反射导致光被俘获。通过这种陷光方式,最多可以将入射光的路程长度扩大至  $4n_2$  (约 50) 倍,因此光线被吸收的可能性将显著增加。

(5) 太阳能电池对更大波长辐射的转换效率(或红光响应)可以通过增加电池“背电场”的方式来改善,也就是降低背表面的复合速率。

#### 2. 复合损失

太阳能电池的效率也会因为电子空穴对在被有效利用之前复合而降低,一些发生复合的场所如图 1-9 所示。图 1-9 所示为电子空穴对复合的一些可能模式,同时表示了未