

Solar Energy Technologies

杨洪兴 周 伟 编著

太阳能建筑 一体化技术与应用

Application of Solar Energy Technologies in Buildings



太阳能建筑 一体化技术与应用

太阳能建筑一体化技术与应用

Application of Solar Energy Technologies in Buildings

杨洪兴 周 伟 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

太阳能建筑一体化技术与应用/杨洪兴,周伟编著.
北京:中国建筑工业出版社,2008
ISBN 978-7-112-10377-5

I. 太… II. ①杨…②周… III. 太阳能住宅-建筑设计 IV. TU241.91

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第144106号

本书分三大部分共十一章。第一部分为建筑物光伏一体化技术。重点讲述了光伏建筑的设计、施工及维护并给出了应用实例;对光伏建筑的经济、环境和市场前景进行了分析。第二部分为建筑物太阳能空调技术。对太阳能吸收式制冷、太阳能吸附式制冷等系统的工作原理、设计方法进行了阐述;详细介绍了太阳能除湿技术理论,并对其性能进行了模拟分析;分析了常用的太阳能蓄热方式;给出了太阳能空调技术与建筑物结合的设计方法及工程实例。第三部分为建筑物其他太阳能利用技术,主要包括太阳能热利用技术及太阳能光导管照明及光纤照明技术。对太阳能集热器的原理、性能及选择计算进行了分析。

本书可供太阳能建筑设计、施工及运行维护人员、建筑投资开发商、从事太阳能研究工作人员参考,也可作为高等学校本科生、大专学生、业余大学和函授大学的教学、培训用书。

* * *

责任编辑:张文胜 姚荣华

责任设计:赵明霞

责任校对:刘 钰 陈晶晶

太阳能建筑一体化技术与应用

Application of Solar Energy Technologies in Buildings

杨洪兴 周 伟 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:23 $\frac{3}{4}$ 字数:593千字

2009年1月第一版 2009年1月第一次印刷

印数:1—3000册 定价:52.00元

ISBN 978-7-112-10377-5

(17301)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

随着国际石油价格持续上涨和国内煤炭价格上调压力的增大,我国能源供应正面临着前所未有的严峻形势。地球上的环境由于大量燃烧矿物能源已产生很明显的变化,人们世代赖以生存的环境正在逐渐恶化,减少传统常规能源的消耗量、节能减排、保护环境的迫切性已引起我国各级政府的高度重视。建筑能耗是各行业中的耗能大户,在我国已经接近占总能耗的 30%,如何有效地降低建筑能耗是目前人们关注的焦点之一。“开源节流”是解决能源安全问题的唯一选择,在大力节能的基础上如何使用可再生能源,降低建筑物传统能源消耗量是近几年人们的努力方向。太阳能以其清洁、用之不竭的特性近几年再次引起人们的高度关注,比如太阳能光伏建筑发电产品的生产和销售平均每年都以超过 30% 的速度增长,太阳能光伏建筑发电和太阳能热利用将成为最普及的建筑物可再生能源利用形式。

太阳能在建筑上的应用最为有效的方法之一是采用建筑光伏一体化(BIPV),即光伏建筑,在建筑物上镶嵌太阳能光伏板发电为建筑物提供全部或部分电力。建筑物(包括住宅,商用和公用建筑物)能耗通常占一个国家和地区全部能源消耗的 30%~50%(在香港地区高达 50%多),利用光伏建筑发电对于减少常规电力消耗量,降低供电高峰负荷和保护地球环境具有重要意义。如果在房屋屋顶和外墙上安装太阳能光伏板,不仅可以利用太阳能发电,而且可以替代传统的玻璃幕墙、屋顶和墙面材料,降低房屋和太阳能项目的整体造价。还可以降低建筑物的冷负荷,达到建筑物能源的有效利用,降低建筑物能耗,为建筑物创造宜人的生活环境。本书详细介绍了光伏建筑的基本知识、设计原理和运行管理经验。

太阳能热利用最近几年也有很好的发展,利用先进的太阳能系统,将太阳能资源应用到建筑物的制冷、空调、热水供应等系统中,可以有效地降低传统能源的消耗量。本书系统地论述了太阳能制冷、空调和热水利用的基本知识,介绍了国内外太阳能热利用的发展趋势,以及我国在太阳能热利用方面的进展和优势。探讨了太阳能热系统与建筑物结构有机结合的方式方法,从建筑类型、结构设计、安装施工、运行管理和国内外典型实例等方面对其进行了介绍和分析,也简要说明了太阳能热利用系统性能的模拟仿真及其在建筑物设计中的几个较深入的问题。

本书也介绍了建筑物太阳能光纤照明技术的设计、施工和运行管理等较感兴趣的题目,力争使读者能够了解太阳能应用在建筑物上技术的新进展。

本书的写作本着易懂和实用的原则,内容包括太阳能应用的基本知识、太阳能建筑技术系统和部件的设计、经济性,工程的招标、系统的测试、验收和运行维护等。本书可供新能源开发研究和利用者、建筑设备工程师、建筑师、建筑开发商和城市规划者使用,也可供高校的学生及专业人员培训使用。

本书由杨洪兴和周伟合作编著。郑广富、安大伟、娄承芝、吕琳、崔萍、满意、李红、李雨桐、孙亮亮、王安兰和汪远昊参与了本书的编写工作。我们希望此书的出版能为我国的太阳能技术在建筑上的应用起到促进的作用,使我国的建筑常规能耗大大降低,为建设可持续发展的节能型社会做出贡献。

作者
2008 年 8 月

目 录

第一部分 建筑物光伏一体化技术

第 1 章 光伏建筑发电系统简介	1
1.1 光伏发电的基本知识	2
1.1.1 光伏发电原理	2
1.1.2 光伏材料	5
1.1.3 太阳能电池	6
1.1.4 光伏建筑一体化	13
1.2 太阳能光伏发电系统	21
1.2.1 独立光伏发电系统	22
1.2.2 光伏并网发电系统	26
1.2.3 风力、光伏和柴油机一体化发电系统	35
1.3 太阳能光伏建筑发电系统的主要部件	39
1.3.1 太阳能电池板	39
1.3.2 电能储存	42
1.3.3 逆变器	50
1.3.4 系统控制元件	53
1.3.5 安全运行元件	57
参考文献	60
第 2 章 光伏建筑系统的设计、施工及维护	61
2.1 光伏建筑系统的设计计算	61
2.1.1 当地气象参数的收集	61
2.1.2 负载情况分析	62
2.1.3 光伏板最佳倾斜角的确定	62
2.1.4 光伏系统总功率的概算	66
2.2 光伏建筑复合结构的传热和发电模拟仿真	70
2.2.1 光伏屋顶的传热和发电模拟仿真	70
2.2.2 光伏墙的传热和发电模拟仿真	75
2.2.3 光伏幕墙和双层光伏窗的传热模拟研究	89
2.3 太阳能光伏建筑系统的安装	98
2.3.1 光伏电池板的安装	99
2.3.2 蓄电池的安装与维护	103
2.3.3 逆变器的安装	107
2.3.4 电子线路的安装	110
2.3.5 接地及防雷安装	112
2.3.6 工程验收	117

参考文献	120
第3章 光伏建筑的相关法令和应用实例	121
3.1 新能源政策对光伏建筑发展的影响	121
3.1.1 国外光伏建筑的发展	121
3.1.2 我国光伏建筑的发展	123
3.1.3 香港地区光伏建筑的发展	123
3.1.4 发展光伏建筑的基本矛盾	124
3.1.5 对光伏建筑发展的建议	124
3.2 国内外光伏发电系统的相关标准和规定	127
3.2.1 独立光伏发电系统的主要标准及规定	128
3.2.2 并网光伏发电系统的主要标准及规定	129
3.2.3 中华人民共和国可再生能源法	130
3.2.4 香港地区可再生能源发电系统与电网接驳的技术指引	131
3.3 香港地区光伏建筑应用实例	132
3.3.1 香港理工大学光伏建筑一体化系统	133
3.3.2 香港理工大学 Y 楼光伏系统	135
3.3.3 湾仔政府大楼光伏建筑一体化系统	136
3.3.4 基慧小学(马湾)光伏建筑一体化系统	139
3.3.5 香港机电工程署总部大楼的光伏系统	142
3.3.6 香港科学园的光伏建筑一体化系统	142
3.3.7 嘉道理农场光伏发电系统	143
3.3.8 光伏建筑应用前景	145
参考文献	146
第4章 光伏建筑的经济、环境和市场前景分析	147
4.1 光伏建筑的经济性分析	147
4.1.1 经济效益评价的基本原理	147
4.1.2 光伏建筑一体化系统的经济效益	149
4.1.3 光伏建筑一体化系统的成本	150
4.1.4 典型案例分析	151
4.2 光伏建筑一体化系统对环境的影响	153
4.2.1 光伏组件的生产	153
4.2.2 光伏系统的运行	153
4.2.3 光伏组件的回收	153
4.2.4 光伏系统的可持续性分析	154
4.3 光伏一体化系统的发展和前景	158
4.3.1 世界光伏产业和市场的发展	158
4.3.2 光伏一体化系统在世界各国的发展	159
4.3.3 世界光伏技术发展趋势	162
4.3.4 世界光伏发展的目标和发展前景	164
参考文献	166

第二部分 建筑物太阳能空调技术

第5章 太阳能制冷技术	167
--------------------------	------------

5.1 太阳能热利用及太阳能集热器	168
5.1.1 真空管太阳能集热器	168
5.1.2 聚焦型太阳能集热器	173
5.1.3 太阳能集热器的热性能	175
5.2 太阳能吸收式制冷技术	176
5.2.1 吸收式制冷原理	176
5.2.2 吸收式制冷的性能指标	177
5.2.3 溴化锂吸收式制冷	178
5.2.4 氨-水吸收式制冷	186
5.2.5 太阳能吸收式制冷系统	188
5.3 太阳能吸附式制冷技术	193
5.3.1 太阳能吸附式制冷原理	194
5.3.2 基本型吸附式制冷循环	195
5.3.3 连续回热型吸附式制冷循环	197
5.3.4 双效复叠吸附式制冷系统	198
5.4 其他太阳能制冷方式	200
5.4.1 太阳能蒸气喷射式制冷	200
5.4.2 太阳能热机驱动蒸汽压缩式制冷	202
参考文献	205
第6章 太阳能除湿空调技术	206
6.1 太阳能在空调系统中应用的契机——温湿度独立控制	206
6.1.1 除热除湿的特点和现有技术的缺点	206
6.1.2 温湿度独立控制及其特点	207
6.1.3 高温冷源的选择	208
6.1.4 空调末端的选择	210
6.2 太阳能固体吸附式除湿装置	211
6.2.1 转轮除湿机的工作原理	211
6.2.2 转轮除湿系统的特点	212
6.2.3 转轮除湿机吸附材料的研究进展	212
6.2.4 基于太阳能再生的转轮除湿独立新风系统	214
6.2.5 除湿转轮的数学模型	215
6.3 太阳能溶液除湿空调	218
6.3.1 溶液除湿原理简述	218
6.3.2 太阳能溶液除湿空调的应用	220
6.3.3 除湿溶液对空气质量的影响	221
6.3.4 溶液除湿器分类	222
6.3.5 溶液除湿潜能蓄能性能分析	222
6.3.6 除湿剂的选择	224
6.3.7 填料的选择	224
6.3.8 三种除湿器性能的比较	225
6.3.9 太阳能溶液再生装置	226
6.3.10 太阳能溶液集热/再生器性能实验研究	228
6.3.11 太阳能溶液除湿空调系统全年性能模拟与经济分析	237

6.3.12 小结	246
参考文献	246
第7章 太阳能制冷与空调系统的蓄能方式	249
7.1 太阳能热储存	249
7.1.1 热能存储的基本原理	249
7.1.2 热量储存的评价依据	250
7.1.3 太阳能蓄热系统中应注意的问题	251
7.1.4 显热蓄热	252
7.1.5 相变蓄热	257
7.1.6 化学能蓄热	264
7.2 蓄能太阳能空调系统	266
7.2.1 显热蓄能太阳能空调系统	266
7.2.2 潜热(相变)蓄能太阳能空调系统	268
参考文献	271
第8章 太阳能制冷、空调与建筑物的有机结合	274
8.1 影响太阳能制冷空调的气候条件	274
8.1.1 我国的太阳能资源分布	274
8.1.2 气候对太阳能制冷、空调的影响	275
8.2 太阳能制冷、空调技术与建筑设计的结合	277
8.2.1 合理设计和规划建筑物	277
8.2.2 建筑物降低夏季冷负荷的防热综合措施	278
8.2.3 太阳能制冷、空调技术与建筑物的有机结合	280
8.2.4 太阳能集热系统与建筑物结合设计的实施	282
8.2.5 太阳能集热系统与建筑物有机结合的发展前景	283
8.3 太阳能制冷、空调技术在建筑物中的应用研究	284
8.3.1 太阳能制冷、空调系统的特点	284
8.3.2 太阳能制冷、空调技术在我国的应用实例	284
8.3.3 太阳能制冷、空调技术在世界其他国家的研究及应用	288
参考文献	291

第三部分 其他太阳能技术在建筑中的应用

第9章 太阳能热利用技术简介	293
9.1 太阳能热利用中的传热问题	294
9.1.1 传热学基础知识	294
9.1.2 太阳能热利用中的典型传热过程	296
9.2 太阳能集热、干燥技术	299
9.2.1 太阳能集热器	299
9.2.2 太阳能干燥技术	315
9.3 太阳能的热储存及热水系统	322
9.3.1 太阳能热储存技术	322
9.3.2 太阳能热水系统	327
参考文献	333

第 10 章 太阳能热系统与建筑物的结合	334
10.1 太阳房	334
10.1.1 被动式太阳房的结构和原理	334
10.1.2 太阳房设计要求	335
10.1.3 太阳房热工计算	336
10.1.4 太阳能温室	337
10.1.5 太阳能热储存和集热方式	339
10.2 太阳能建筑热水系统一体化	342
10.2.1 太阳能建筑热水一体化系统结构	343
10.2.2 太阳能热水系统与建筑结合的特点	343
10.2.3 设计需要考虑的一般原则	343
10.2.4 太阳能建筑热水系统一体化实例和年能耗模拟分析	345
10.3 太阳能热利用建筑的经济分析	347
10.3.1 经济分析的必要条件	347
10.3.2 经济方法概要	348
10.3.3 太阳能热系统的成本	349
10.3.4 太阳能转换系统设计参数	349
10.3.5 太阳房经济性分析	350
参考文献	351
第 11 章 太阳能照明技术	353
11.1 太阳能照明装置	353
11.1.1 太阳能光纤照明技术	354
11.1.2 太阳能光导管照明系统	360
11.2 太阳能照明系统设计与应用	363
11.2.1 太阳能光纤照明技术的设计	364
11.2.2 太阳能光导管照明技术在隧道中的应用	365
11.2.3 高层大厦远程采光系统的设计	367
11.2.4 太阳能照明系统的应用实例	368
参考文献	371

第一部分 建筑物光伏一体化技术

目前在建筑中注入绿色元素（诸如太阳能），已成为建筑发展的趋势，且绿色建筑也将是 21 世纪世界建筑的主流。绿色建筑有其丰富的内涵，各国评价标准不一，但洁净能源，尤其是太阳能的合理、高效利用是绿色建筑的重要内容。此部分主要从光伏建筑一体化方面对太阳能在建筑物中的应用进行了介绍。光伏建筑一体化（BIPV）提出了“建筑物产生能源”的新概念，即通过建筑物，主要是屋顶和墙面与光伏发电集成起来，使建筑物自身利用绿色、环保的太阳能资源生产电力，光伏建筑一体化必将成为绿色建筑和建筑节能技术的发展趋势。

此部分主要介绍了太阳能光伏发电与建筑物相结合的技术，并把环境保护和经济性结合起来，系统地介绍了这项快速发展的新能源技术。首先给出有关太阳能和光伏技术的基本知识，同时还介绍了光伏发电系统的各主要部件（如光伏电池、控制器、逆变器以及蓄电池）的类型、特点和性能，可供读者设计时参考。然后根据光伏建筑的相关法令和应用实例着重介绍了太阳能光伏发电和建筑物相结合的设计以及性能评价技术，介绍了太阳能建筑光伏系统设备工程的安装、系统操作等新世纪高科技理论和实践经验，推动新世纪环保建筑的发展。由于受到高成本的影响，太阳能光伏建筑和其他光伏发电技术的应用发展在中国大陆和中国香港地区受到很大限制，其应用规模与国外先进国家相比差得很多。造成这种现象的主要原因是我们的可再生能源政策问题，没有政府补贴和没有优惠上网电价是主要问题所在。所以此部分还给出了国内、外关于光伏发电系统设计、安装以及检测等方面的标准和规定，同时在简要介绍香港地区的几个建筑物光伏发电系统实例的基础上，将香港地区对光伏系统并网发电所需要办理的手续进行了简要叙述，希望能为制定新能源政策提供参考。

第 1 章 光伏建筑发电系统简介

太阳能光伏建筑发电是新世纪的一种最重要的可再生能源，同时又是高科技在建筑中的创新应用。人人都应该了解它、熟悉它和利用它。从整体来看，我们要研究光伏太阳能，是因为太阳能是地球上对环境起保护作用的最重要能源，是“取之不尽，用之不竭”的可再生能源，同时又是唯一满足宇宙空间中卫星和航空器所需要的能源。随着能源需求量的不断增加，原有的传统能源（如煤、石油和石油气等矿物化石燃料）不但对环境已产生极其严重的污染，而且在不远的将来就会耗尽。因此，我们必须研究和发展可再生能源，特别是必须研究和发展“取之不尽，用之不竭”的自然界能源——太阳能。

要将太阳能转变成电能，供给人们使用，必须通过产生光伏效应的装置——太阳能电池来实现太阳能的光电转换。本章主要介绍太阳能光伏发电技术及其在建筑物应用方面的一些基本知识。

1.1 光伏发电的基本知识

1.1.1 光伏发电原理

太阳能是太阳内部原子核聚变爆发出的能量。在太阳的中心,产生着由氢转变成氦的原子核反应,并于每秒钟释放出4百万吨的质能。根据爱因斯坦的质能相当性关系公式:

$$E=mc^2 \quad (1-1)$$

式中 E ——能量;

m ——质量;

c ——光速, $c=3 \times 10^8$, m/s。

原子核反应过程中,4个氢转变成1个氦,同时产生所含质量的1/141的能量。这相当于 $1.39 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。太阳的内部温度达到3000万摄氏度以上,通过外表面太阳辐射出了巨大的能量。

太阳中心的强烈辐射被接近太阳表面的氢气原子层吸收,其能量通过光的阻挡层作对流热传输,然后太阳从它的外表面把它的能量以电磁波的形式发射出去,这种电磁波的波长范围由紫外线波长($0.2 \mu\text{m}$)经过可见光至近红外线波长($5 \mu\text{m}$)。太阳辐射出的紫外线—可见光—红外线的电磁波,包括太阳的热辐射,携带着太阳释放出的所有能量,统称为太阳能。从太阳发射出来的太阳能,要经过外空间和大气层的能量传输,才能到达地球表面上的光伏应用装置。要把太阳能转换成被人类利用的电能,首先应该明白太阳能光电转化的发电原理。

1.1.1.1 什么是光伏

光伏就是光转变成电的光生伏特的意思。在光照条件下,光伏材料吸收光能后,在材料两端产生电动势,这种现象叫做光伏效应。表1-1列出了光伏效应的发现和最初期的发展过程。从表中可见,人们很早就已经发现了光伏效应这种物理现象,但光伏的实际应用经历了漫长的探索过程,为使光伏获得广泛的应用,各国研究者们仍在艰苦努力。

光伏效应的发现和最初期的发展过程

表 1-1

年代	人 物	发现和发展	说 明
1839	Edmond Becquerel(法)	光伏(PV)效应——液体	第一次发现 PV 效应
1876	W. G. Adams & R. E. Day	Se 中 PV 效应——固体	适合现在应用
1883	C. E. Fritts	光电池	Se 薄膜光电池
1927	Grondahl-Geiger	Cu_2O 光电池	
1930	Bergman	Cu_2O , Ti_2S , Se	硅也被发现具有 PV 效应

1.1.1.2 光吸收和电的产生

(1) 光吸收

光投射到光伏材料上存在反射、吸收和透射三种可能。对于光伏元件来说,光的反射和透射都是损失,关键是要有效地吸收投射光,以产生电能供人们使用。在忽视反射的情况下,材料对光的吸收量取决于材料的吸收系数和材料厚度。太阳光在光伏材料中由于被吸收而使光强沿材料厚度方向不断下降。根据式(1-2)可以求出太阳能光伏材料中任何

一点的光强 I ;

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (1-2)$$

式中 I_0 ——材料表面的光强;

α ——材料的光吸收系数, cm^{-1} ;

x ——计算光强的某一点与材料表面的距离, 即材料的厚度。

材料的光吸收系数 α 由材料特性和投射光的波长共同决定。因为半导体材料有能带隙 E_g , 如果光子没有足够的能量激发出电子, 并使产生的电子跨过这个能带隙 E_g , 光子就不被吸收而透过, 所以半导体材料光吸收系数光谱分布有一个峰值。对于某一特定的材料, 随着不同的光子能量 E_p (即不同的光波长) 而形成光吸收系数的光谱分布。光吸收系数 α 并非常数, 当一些光子的能量非常接近导带底时, 也会容易被吸收而产生电子-空穴对。而能带隙 E_g 本身的大小也会随温度、材料的杂质和其他因素的变化而产生变化。

(2) 电的产生

式 (1-2) 可用来计算太阳能电池产生电子-空穴对的数量。假定吸收光子使光强的减少量完全用于产生电子-空穴对, 那么在薄片材料中电子-空穴对的产生量 G 可以通过薄片的光强变化来计算。因此, 对式 (1-2) 进行微分得到式 (1-3), 就能求得太阳能电池材料中任何一点产生电子-空穴对的数量 G :

$$G = \alpha \varphi e^{-\alpha x} \quad (1-3)$$

式中 φ ——光通量, cm^2/s 。

目前使用的光伏材料多为半导体, 能量为 $E_p = h\nu$ 的光子落在半导体材料上时可分为以下三种情况:

1) $E_p < E_g$, 即光子能量 E_p 小于能带隙 E_g 时, 光子没有足够的能量产生电子跨过这个能带隙, 光子不被吸收而透射过这个材料;

2) $E_p = E_g$, 即光子能量 E_p 等于能带隙 E_g 时, 光子刚好有足够能量产生电子跨过这个能带隙, 光子有效地被吸收, 而且无热量产生所造成的能量损失;

3) $E_p > E_g$, 即光子能量 E_p 大于能带隙 E_g 时, 光子强烈地被吸收, 而且有热量产生而造成能量损失。

1.1.1.3 电能——电功率的产生

(1) 电流的产生——光生载流子的收集

太阳光入射到太阳能电池会产生电子-空穴对, 由于光生少数载流子必须在被复合之前就要跨过 p-n 结才能对外电路做贡献, 少数载流子一旦跨过 p-n 结会被收集。这时, 如果外电路与太阳能电池连接就有电流产生并通过外电路收集到太阳能电池产生的光生电流。理想太阳能电池的光生电流就是没有外加偏压时的外电路电流。

在 p-n 结内部自建电场作用下, 把 p-n 结 p 型区一侧的电子 (少数载流子) 扫过耗尽区到达 n 型区一侧, n 型区一侧的空穴 (少数载流子) 扫过耗尽区到达 p 型区一侧。总之, 使光生少数载流子跑到另一侧变成多数载流子, 为外电路做贡献。

外电路短路时, p-n 结两侧的少数载流子增大, 与少数载流子数目相关联的漂移电流增大。太阳能电池在太阳光照射下, 外电路短路时的电流就叫做短路电流 I_{sc} , 是太阳能电池可以输出的最大电流, 此时太阳能电池输出电压为 0。

(2) 电压的产生——电功率输出

光生载流子本身不能升格为电功率（电能能源），例如检测用的光电二极管可收集到很高的光生电流 I ，但不能产生任何电功率。为了产生电功率 P ，必须同时产生电压 V 和电流 I ，这就是电功率 $P=IV$ 。

零偏压时，光生少数载流子跨过 p-n 结内部，自建电场就失去从光子能量所得到的额外能量。如果光生载流子仍然留在太阳能电池内部而不被外电路抽取（例如没有外电路连接的情况），太阳能电池不能输出光生载流子，而太阳能电池的光生载流子（电子-空穴）产生电荷分离。p 型区的电子被扫过耗尽区到达 n 型区，n 型区的空穴被扫过耗尽区到达 p 型区。由于没有外电路连接，光生载流子的分离降低了 p-n 结的电场。因为电场是阻挡扩散电流的势垒，电场降低就增大了扩散电流，这是太阳能电池的 p-n 结处于正向偏置下的情况。

外电路开路（断开）的情况下，总电流必然为零，太阳能电池没有光生电流输出。光生载流子使 p-n 结处于正向偏置，扩散电流等于跨过 p-n 结的光生电流（即漂移电流）。外电路开路时，使这两种电流（即扩散电流和漂移电流）达到平衡所需要的电压，就叫做开路电压 V_{oc} ，是太阳能电池输出的最大电压。因为漂移电流与扩散电流是反方向的，外电路开路时内部这两种电流达到平衡，太阳能电池输出电流为 0。

太阳能电池吸收了入射的太阳光子后产生了荷电的载流子，在外电路有电流和电压，通过外电路的负载去做功。

1.1.1.4 光伏元件

太阳能电池本质上就是一个二极管，这种二极管具有光伏效应，能把光能直接变换成电能，因此，太阳能电池又称为光伏元件。

光照射在太阳能电池上就会产生电子-空穴对。器件内部能把这些电子和空穴分开，产生电压和带电的粒子。当用电负载（如电灯泡等）与太阳能电池两端接头分别连接时就有电压在负载两端出现，有电流通过负载，这就是太阳能电池发电。电流和电压的乘积就是功率，功率和使用时间的乘积就是功（能）。

表 1-2 和表 1-3 列出了大块晶片太阳能电池和薄膜太阳能电池的研究和发展情况。从表中可以了解到，太阳能电池的研究已经经历过相当长的时间，现在的发展集中于努力探索可降低成本和获得高效率的薄膜太阳能电池的生产，使太阳能电池物美价廉。

大块晶片太阳能电池的研究和发展

表 1-2

年代	代表人和物	研究和发展	说 明
1941	Ohl	p-n 结硅太阳能电池	约 1%效率
1954	Pearson, Fuller&Chapin	4.5%效率, Li 扩散 p-n 结	Bell(贝尔)实验室
1956	Pearson, Fuller&Chapin	10%效率, B 扩散 p-n 结	半导体技术突破
1958	Vanguard-I, 1958 年 3 月 17 日发射	第一颗人造卫星	第一次使用太阳能电池
1960		14%效率	IC 时代开始
1970		17%效率, BSF, “紫外”	“黑”电池, 串迭电池
1980		20%效率, 硅太阳能电池	UNSW(澳大利亚)
1990		24.5%效率, 硅太阳能电池	UNSW(澳大利亚)

薄膜太阳能电池的研究和发展

表 1-3

年代	代表人物	研究和发展	说 明
1883	Fritts	第一个薄膜太阳能电池	30cm ²
1927	Grondahl	Cu-Cu ₂ O 光电池	也用作整流器
1931	Bergmann	Se, Cu-Cu ₂ O 光电池	
1939		Tl ₂ S 光电池	
1950		CdS, CdTe, GaAs	
1970		非晶硅, 多晶硅, CuInSe ₂	
1980		非晶硅	误以为是唯一薄膜太阳能电池
1990		17.8%效率, 硅薄膜太阳能电池	UNSW(澳大利亚)
最近		18.8% CIGS 薄膜太阳能电池	USA

1.1.1.5 光伏板

一个太阳能电池就是一个小型发电机。为了增大功率输出, 要把许多个太阳能电池连接起来, 装配成一大块的太阳能电池板, 简称光伏板。

1.1.2 光伏材料

1.1.2.1 半导体

世界上所有的材料物质都可分为固体、液体和气体, 其中固体又可分为导体和绝缘体。有一种材料, 在低温下是绝缘体, 但这种材料加入杂质、得到能量或加热时就变成导体, 这种材料叫做半导体。现在实际使用的太阳能电池都由半导体材料制成。显示带正电性质(有较高的空穴浓度)的半导体材料叫 p 型半导体, 显示带负电性质(有较高的电子浓度)的半导体材料叫 n 型半导体。

1.1.2.2 半导体分类

用于太阳能电池的半导体材料有单晶体、多晶体和非晶体三种形式。

(1) 单晶体

整块晶片只有一个晶粒, 晶粒内的原子有次序地排列着, 不存在晶粒边界, 单晶体要求严格的精制技术。

(2) 多晶体

多晶体的制备不要求那么严格的精制技术。一块晶片含有许多晶粒, 晶粒之间存在边界。由于边界存在很大电阻, 晶粒边界会阻止电流流动, 或电流流经 p-n 结时有旁路分流, 并在禁带内有多余能级把光产生的一些带电粒子复合掉。

(3) 非晶体

原子结构没有长序, 材料含有未饱和的或悬浮的键。非晶体材料不能用扩散(加入杂质)的方法改变材料导电类型。但加入氢原子会使非晶体中一部分悬浮键饱和, 改善了材料的质量。

1.1.2.3 半导体 p-n 结

太阳能电池实质上就是半导体 p-n 结二极管。p-n 结不仅是太阳能电池, 也是发光二极管、半导体激光器、光电探测器等的核心和本质。p-n 结把太阳能电池内部产生的电子-空穴对分离开来向外供电, 又把这些带电粒子的产生、复合、扩散和飘移等物理过程结合在一起形成单一器件功能。

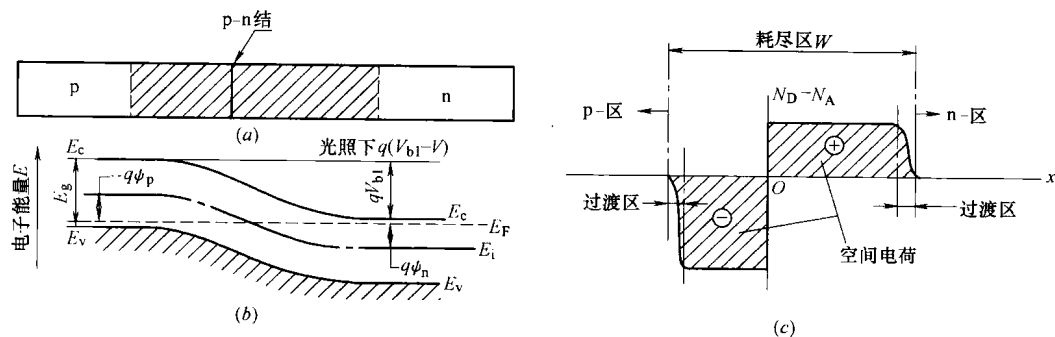


图 1-1 半导体 p-n 结的能带结构

(a) p-n 结；(b) 热平衡状态下无照光的半导体 p-n 结能带结构，此时的自建电势垒是 qV_{bi} ；
有光照时的电势垒是 $q(V_{bi}-V)$ ；(c) 耗尽区 W

图 1-1 给出了半导体 p-n 结的能带结构。p-n 结是把 p 型和 n 型半导体材料结合在一起制成的。通常用扩散或注入的方法加入不同性能的杂质而得到。p 型区有较高的空穴浓度，n 型区有较高的电子浓度，在 p 型和 n 型区的交接处，空穴从浓度高的 p 型区扩散到 n 型区而留下带负电的离子中心；同样，电子从浓度高的 n 型区扩散到 p 型区而留下带正电的离子中心。这些带电的不动的离子中心在交接处形成了从 n 型区（正电离子）指向 p 型区（负电离子）的电场，即为自建电场 E_{bi} 。自建电场形成了自建电势垒 V_{bi} ，阻挡带电粒子的扩散。这个交接处叫做 p-n 结的耗尽区或耗尽层，也叫阻挡层。

1.1.2.4 p-n 结的工作原理

p-n 结的自建电场 E_{bi} 的正方向由 n 型区指向 p 型区。外加电压会产生另一个电场与它相互作用。

1) 无外加电场：外接断路（或不接外路）时的状态。p-n 结无外加电场，只有自建电场 E_{bi} ，p-n 结处于平衡状态，带电粒子的漂移电流等于带电粒子的扩散电流，外电路没有电流。

2) 外加正向电压：p 型区一侧外接正极的状态。外加电场与自建电场的方向相反，p-n 结的电场减少。由于耗尽区内的电阻率大大地高于耗尽区外，外加电压几乎全部落在耗尽区。理想情况下，耗尽区的自建电场总是大于外加电场。正向偏压下，电子从 n 型区注入 p-n 结耗尽区，流经 p 型区，通过外接电路再流入 n 型区与空穴复合；空穴从 p 型区注入 p-n 结耗尽区，流经 n 型区跟电子复合。外电路有电流，电流大小随着外加正向电压的大小而变。

3) 外加反向电压：p 型区一侧外接负极的状态。这样，外加电场与自建电场的方向相同，p-n 结的电场增大。p 型区产生的电子会加速漂移过 p-n 结耗尽区到 n 型区；n 型区产生的空穴会加速漂移过 p-n 结耗尽区到 p 型区。外电路没有电流，但电压很高。

1.1.3 太阳能电池

1.1.3.1 太阳能电池的分类

太阳能电池种类繁多，其分类方法大致如下：

从材料来分，有硅太阳能电池、砷化镓太阳能电池、镓磷太阳能电池、铜铟镓硒太阳能电池和碲化镉太阳能电池等。

从内部材料体型来分,有大块晶片太阳能电池和薄膜太阳能电池。

从材料的晶体结构来分,有单晶太阳能电池、多晶太阳能电池和非晶太阳能电池。

从内部和外部结构来分,有普通太阳能电池、聚光型太阳能电池和级联太阳能电池等。

从内部结构的 p-n 结多少或薄层多少来分,有单结太阳能电池、多结或多层太阳能电池。

从技术方法来分,有网板印刷电极太阳能电池和激光刻槽电极太阳能电池。

从 p-n 结结构来分,有同质结太阳能电池和异质结太阳能电池。

除了上面的固体太阳能电池之外,还有液体太阳能电池,如电解液、染料太阳能电池等。

1.1.3.2 理想的太阳能电池

利用太阳能光伏原理制造的太阳能电池,必须知道其各种特性,才能懂得太阳能电池的利用价值,并如何去发挥其潜力。

没有光照射时,太阳能电池就是一个普通的 p-n 结二极管。热平衡态下,由于没有光照,太阳能电池两端没有电压,外接电路也没有电流。在内部的带电粒子:电子和空穴以飘移方式和扩散方式跨过 p-n 结,在内部达到平衡。

有光照射时,太阳能电池 p-n 结两侧产生大量电子-空穴对。为了使太阳能电池产生电力,必须把光生电子-空穴对的少数载流子提取。为了使太阳能电池光-电转换效率高,必须具有以下条件:

- 1) 高电流: 光生载流子的收集率要高;
- 2) 高电压: 光生电流的收集应在尽可能高的电压下出现;
- 3) 低寄生电阻: 尽可能使低的寄生串联电阻而高的寄生并联电阻出现。

考虑一个理想 p-n 结太阳能电池跟一个负载 R_L 连接,如图 1-2 (a) 所示。注意,图中的 I 和 V 表示的是惯用的正电流和正电压的方向。如果负载短路了,电路只有光生电流 I_p ,如图 1-2 (b) 所示,光强越强,电子-空穴对的产生率越高,光生电流 I_p 越大。如果用 I 表示光强,则短路电流 I_{sc} 为:

$$I_{sc} = -I_p = -KI \quad (1-4)$$

式中 K 是一个常数,大小由特定的器件决定。光生电流 I_p 并不由跨过 p-n 结的电压来决定,因为总有一些内电场使光生电子-空穴作飘移运动。我们不考虑电压调节耗尽区宽度的二次效应。因而,即使没有电压跨过器件时也有光生电流 I_p 。

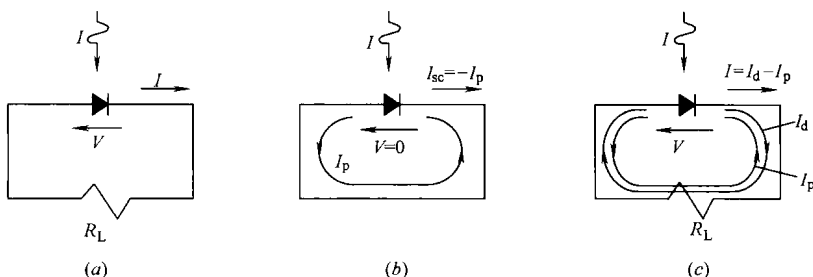


图 1-2 太阳能电池与负载的连接方式

- (a) 跟外电路负载 R_L 连接的理想太阳能电池, 常规的正向电压和正向电流; (b) 短路时的太阳能电池, 此时的电流就是光电流和短路电流; (c) 太阳能电池驱动外电路负载 R_L , 电路中显示出电压和电流的方向