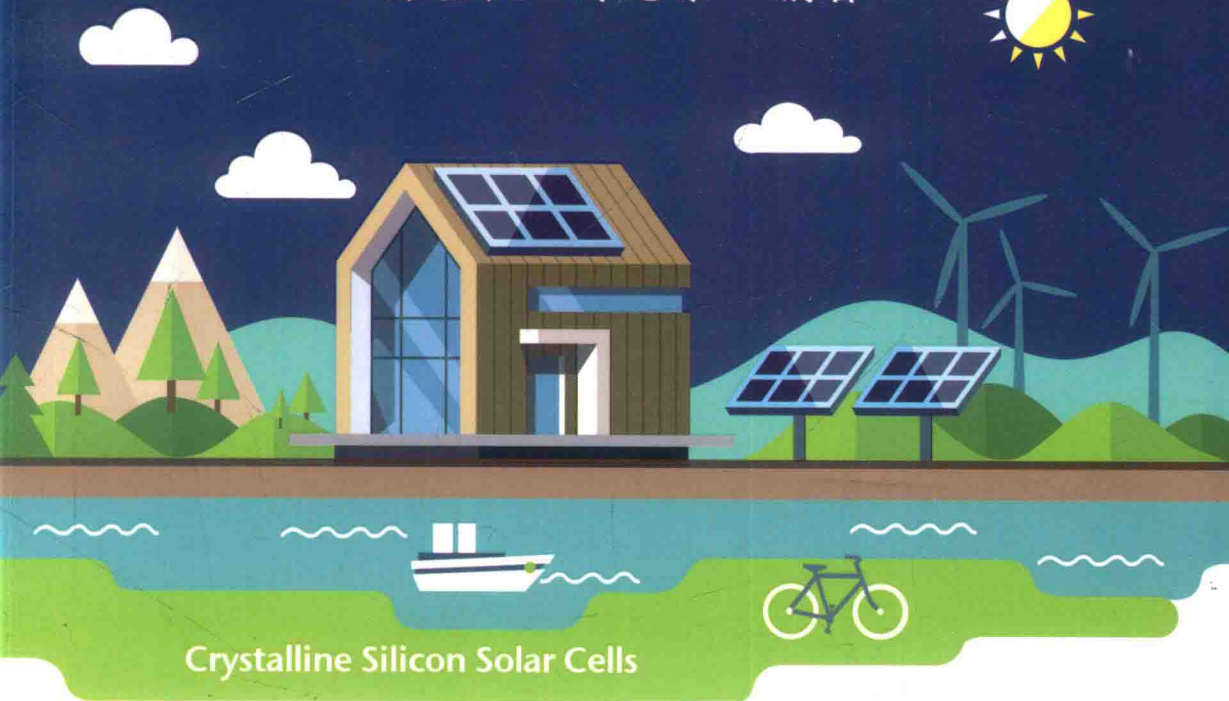




“十二五”国家重点图书出版规划项目 · 新能源技术丛书

晶体硅太阳能电池 制造工艺原理

◆ 陈哲良 郑志东 编著



中国工信出版集团



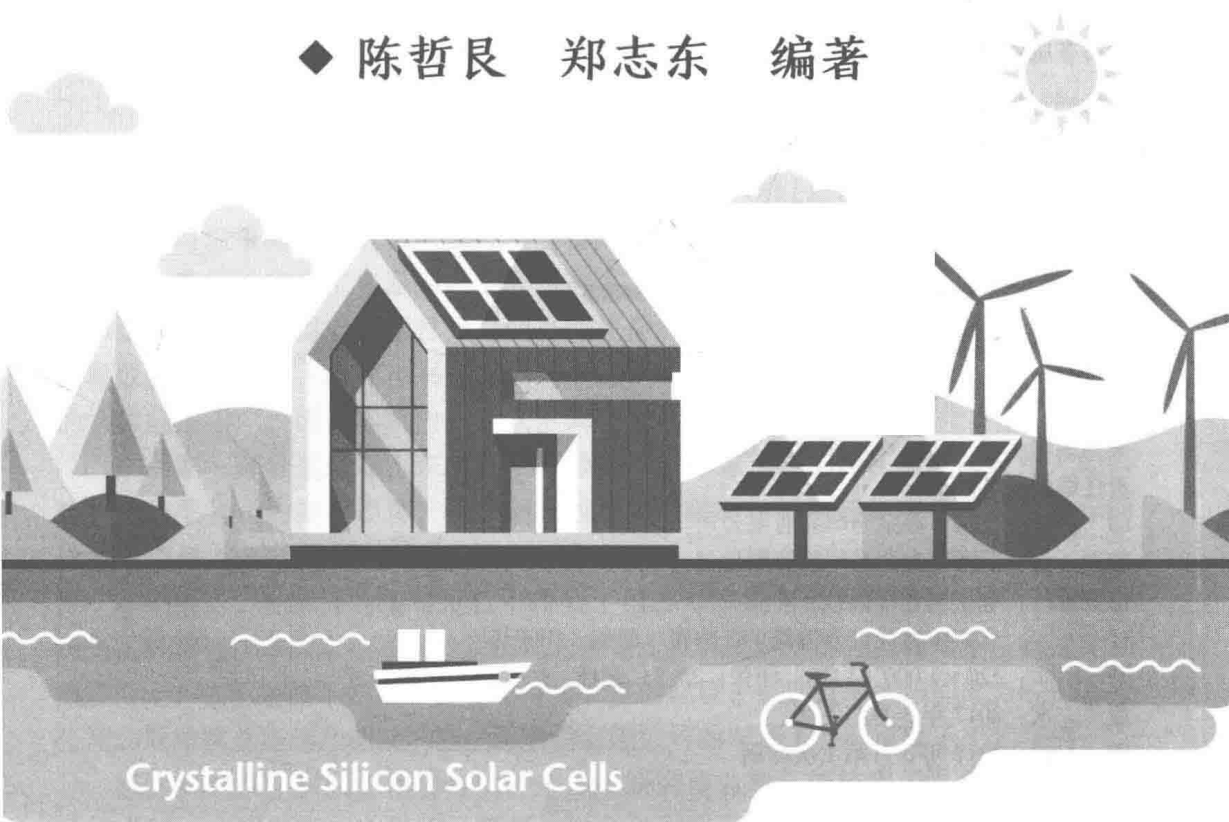
电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



“十二五”国家重点图书出版规划项目 · 新能源技术丛书

晶体硅太阳能电池 制造工艺原理

◆ 陈哲良 郑志东 编著



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍了晶体硅太阳能电池制造工艺原理，主要内容包括绪论、太阳能用多晶硅、太阳能电池用硅晶体、硅片多线切割及测试、硅片的清洗和制绒、掺杂制备 PN 结、硅片表面和边缘刻蚀、减反射膜制备、电极的丝网印刷与烧结、高转换效率晶体硅太阳能电池、太阳能电池组件、太阳能电池及其组件的测试。

本书适合从事太阳能电池制造的工程技术人员阅读使用，也可作为高等学校相关专业的教学用书。

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。

图书在版编目 (CIP) 数据

晶体硅太阳能电池制造工艺原理/陈哲良, 郑志东编著. —北京: 电子工业出版社, 2017.3
(新能源技术丛书)

ISBN 978-7-121-30465-1

I. ①晶… II. ①陈… ②郑… III. ①硅太阳能电池-制造 IV. ①TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 284882 号

策划编辑: 张 剑 (zhang@phei.com.cn)

责任编辑: 苏颖杰

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1000 1/16 印张: 25.5 彩插: 1 字数: 530 千字

版 次: 2017 年 3 月第 1 版

印 次: 2017 年 3 月第 1 次印刷

册 数: 2000 册 定价: 79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: zhang@phei.com.cn。

前 言

这是一本关于晶体硅太阳能电池及其组件制造工艺原理方面的书，旨在作为从事实际工作的技术人员和工程师的参考书，也可作为高等学校光伏专业学生的教学参考书，为读者提供太阳能电池制造技术方面的基本专业知识。

本书的内容选择用晶体硅材料制造的太阳能电池是因为现在晶体硅太阳能电池的生产量仍占有太阳能电池总产量的90%以上。

本书第1章为绪论；其余内容分为三部分：第一部分（第2～4章）介绍多晶硅原材料的制造原理、硅晶体的生长和硅片切割的工艺及原理；第二部分（第5～11章）介绍太阳能电池及其组件的制造工艺，还介绍了新颖的高效太阳能电池以及我国太阳能电池的最新发展；第三部分（第12章）介绍太阳能电池及其组件的质量标准和检测方法。由于阐述的是制造工艺及工艺原理，所以每章内容基本是相对独立的，读者可以根据需要选择性地阅读。

本书撰写的制造工艺原理离不开工艺本身。近10年来，晶体硅太阳能电池的工艺和设备改进可称得上日新月异，而且即使是同一种工艺路线，不同制造厂商的工艺参数也各不相同，因此本书只能以列举实例的形式表述制造工艺。工艺原理涉及的学科范围很广，因此本书内容为众多同行智慧的结晶。

本书第一部分邀请郑志东高级工程师撰写。郑志东高工现任浙江向日葵光能科技股份有限公司的副总经理，在太阳能电池用多晶硅原材料和硅片制备方面有很深的学术造诣和20余年实际工作经验。

本书第二、三部分的撰写过程中得到了很多专家的帮助。首先感谢天合光能公司光伏科学与技术国家重点实验室的冯志强博士及其团队中的陈奕峰博士、徐建美和熊震博士，他们审阅了初稿，并提出许多有益的建议；感谢日地太阳能电力股份有限公司的周体副总经理和浙江鸿禧能源股份有限公司的时利工程师审阅了工艺实例。

感谢我的多年科研工作合作伙伴金步平研究员，他仔细校阅了本书第二、三部分的书稿。感谢电子工业出版社策划编辑张剑和责任编辑苏颖杰对本书撰写及出版提供的帮助，确保了本书的出版质量。

由于时间和作者水平有限，书中的疏漏和错误之处，敬请读者批评指正。

陈哲良

目 录

第1章 绪论	1
1.1 光伏效应	1
1.2 阳光资源	2
1.3 太阳能光伏发电系统	3
1.3.1 太阳能光伏发电系统的结构	4
1.3.2 分布式光伏发电系统	9
1.3.3 微电网系统	10
1.3.4 大型光伏电站	10
1.4 晶体硅太阳能电池和组件的制造	11
参考文献	15
第2章 太阳能用多晶硅	16
2.1 西门子法	17
2.2 硅烷法	22
2.3 流化床法	27
2.4 冶金法	30
参考文献	32
第3章 太阳能电池用硅晶体	33
3.1 直拉单晶硅	33
3.1.1 直拉单晶炉	34
3.1.2 直拉单晶工艺	39
3.1.3 直拉单晶的影响因素	43
3.1.4 杂质的引入、分布和掺杂	47
3.2 铸造多晶硅	49
3.2.1 多晶硅铸造技术	50
3.2.2 定向凝固多晶硅铸锭炉	53
3.2.3 多晶硅铸锭炉热场数学模型	55
3.2.4 多晶硅铸造生长工艺	60

==V==

3.2.5	铸造多晶硅生长的影响因素	61
3.2.6	准单晶硅和高效多晶硅	63
3.2.7	多晶硅铸锭用坩埚	69
	参考文献	72
第4章	硅片多线切割及测试	73
4.1	硅片多线切割	74
4.2	硅晶体性能及测试	79
4.2.1	涡流法电阻率检测	79
4.2.2	硅块少子寿命测试	81
4.2.3	硅块红外探伤	83
4.2.4	无接触硅片厚度测试	84
4.2.5	硅片分选	85
4.2.6	晶硅中的氧	87
4.2.7	晶硅中的碳	92
4.2.8	晶硅中的金属杂质及影响	93
4.2.9	位错和缺陷	96
	参考文献	99
第5章	硅片的清洗和制绒	100
5.1	硅片的选择	100
5.2	硅片清洗	101
5.2.1	硅片表面的沾污源	101
5.2.2	化学清洗原理	101
5.2.3	物理清洗原理	115
5.2.4	硅片及器具的清洗	116
5.3	硅片腐蚀减薄	119
5.4	硅片绒面制备	119
5.4.1	碱腐蚀单晶硅片制绒	120
5.4.2	酸腐蚀多晶硅片制绒	126
5.4.3	硅片制绒质量检验	140
5.5	硅片制绒新技术	140
	参考文献	143
第6章	掺杂制备PN结	144
6.1	扩散法掺杂制备PN结	144
6.1.1	扩散现象	144

6.1.2	扩散层杂质浓度分布	147
6.1.3	两步扩散法制结原理	151
6.1.4	固-固扩散制结原理	154
6.1.5	扩散制结的质量参数	154
6.1.6	扩散制结条件的选择	158
6.1.7	P型硅片的磷扩散制结工艺	166
6.1.8	扩散制结的质量检测	173
6.2	离子注入掺杂制结	181
6.2.1	离子注入掺杂的原理	182
6.2.2	注入离子的离子分布	183
6.2.3	注入离子的离子阻滞	184
6.2.4	离子注入的沟道效应	186
6.2.5	离子注入损伤与退火	187
6.2.6	离子注入掺杂制结工艺	189
	参考文献	190
第7章	硅片表面和边缘刻蚀	192
7.1	干法刻蚀边缘扩散层	192
7.1.1	等离子体刻蚀	193
7.1.2	激光边缘刻蚀隔离	196
7.2	湿法刻蚀表面磷硅玻璃	197
7.3	湿法刻蚀扩散层	199
7.3.1	湿法刻蚀扩散层原理	199
7.3.2	硅片漂浮方式湿法刻蚀	200
7.3.3	滚轮携液方式的湿法刻蚀	207
7.4	硅片周边表面刻蚀后的质量检查	210
	参考文献	212
第8章	减反射膜制备	213
8.1	减反射膜的减反射原理	213
8.2	氮化硅减反射薄膜	215
8.2.1	氮化硅减反射薄膜沉积方法	215
8.2.2	氮化硅膜的热处理	225
8.2.3	双层减反射膜	227
8.3	太阳能电池的表面钝化技术	228
8.4	Al_2O_3 减反射/钝化膜	229

参考文献	237
第9章 电极的丝网印刷与烧结	239
9.1 电极的丝网印刷	241
9.1.1 丝网印刷金属浆料的作用	241
9.1.2 丝网印刷用材料、工具和设备	244
9.1.3 电极的丝网印刷工艺	251
9.1.4 金属栅线电极的高宽比及其测试方法	256
9.2 电极浆料烧结	258
9.2.1 电极浆料烧结机理	258
9.2.2 电极浆料烧结设备及工艺	261
9.2.3 电极浆料烧结质量要求	264
9.3 太阳能电池质量检测	265
参考文献	268
第10章 高转换效率晶体硅太阳能电池	269
10.1 硅基异质结 (SHJ) 太阳能电池	269
10.2 选择性发射极太阳能电池	272
10.3 浅结密栅太阳能电池	283
10.4 铜线主栅太阳能电池	285
10.5 PERC、PERL 和 PERT 结构太阳能电池	287
10.6 黑硅太阳能电池	290
10.7 叉指式背接触 (IBC) 太阳能电池	295
10.8 隧道氧化钝化接触 (TOP-Con) 太阳能电池	296
10.9 双面太阳能电池及组件	297
参考文献	301
第11章 太阳能电池组件	305
11.1 太阳能电池的串联和并联	305
11.2 太阳能电池组件的结构	308
11.3 太阳能电池组件的封装材料	308
11.4 太阳能电池组件的封装工艺	312
11.5 太阳能电池组件的电位诱发衰减 (PID) 效应	316
11.6 双面玻璃封装的太阳能电池组件	317
11.7 特种太阳能电池组件	320
11.8 太阳能电池组件的性能测试	321
参考文献	321

第 12 章 太阳能电池及其组件的测试	322
12.1 太阳辐射的基本特性	323
12.2 太阳模拟器	324
12.3 太阳能电池测试	331
12.4 太阳能电池组件测试	343
12.4.1 太阳能电池组件的光电性能测试	343
12.4.2 太阳能电池组件的设计鉴定和定型	345
12.4.3 太阳能电池组件的安全鉴定	365
12.4.4 太阳能电池组件的其他试验	370
12.4.5 太阳能电池组件的可靠性测试	372
12.5 太阳能电池组件的室外测试	372
12.6 太阳能电池和组件诊断测试	374
12.6.1 电致发光 (EL) 测试	374
12.6.2 光诱导电流 (LBIC) 测试	377
12.6.3 其他诊断测试方法	385
12.6.4 诊断测试性能分析举例	392
12.7 太阳能电池和组件的认证	394
参考文献	395

第 1 章 绪 论

1.1 光伏效应

很多情况下，物质吸收入射光后，光子的能量会使电子激发到高能级，处于高能态的受激电子通常会很快地回到基态。但是有两种情况例外，一种情况是光照射金属时，波长足够短的光会激发金属中的电子，电子获得足够的能量后从金属表面逸出，这种物理现象称为光电效应。爱因斯坦用量子论提出爱因斯坦公式 $E = h\nu$ ，成功地解释了光电效应现象从而获得 1921 年的诺贝尔物理学奖。利用光电效应做成的光电管如图 1-1 (a) 所示，接通外部的电源，光照射后负载上就会有电流流过。另一种情况是在具有 PN 结的半导体中，电子受激后形成电空穴对，在内建电场作用下，电子在返回基态之前会与空穴分离，进入导带，在半导体中 PN 结的两端形成电势差，这种现象称为光伏效应，如图 1-1 (b) 所示，接通外部的电路能驱动负载。

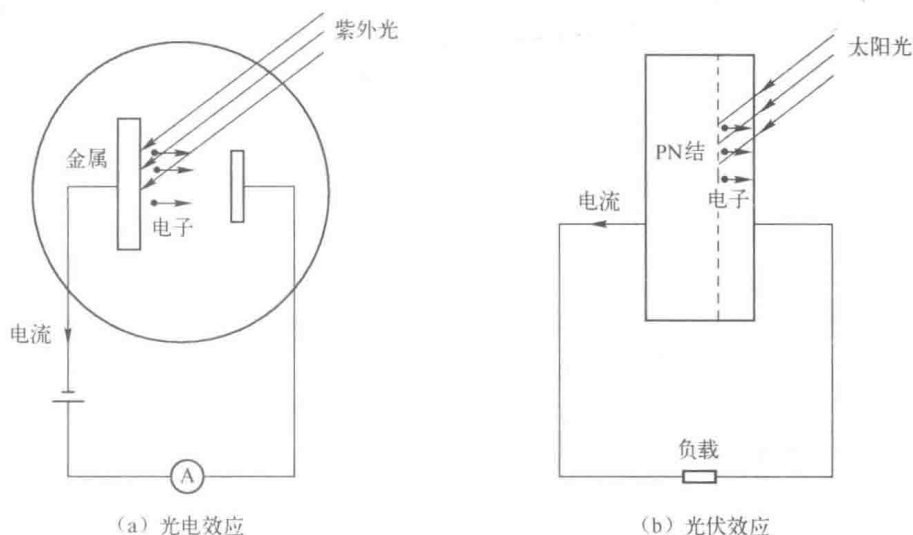


图 1-1 光电效应和光伏效应

光伏效应在 1839 年由法国物理学家亚历山大·埃德蒙·贝克勒尔 (Alexandre - Edmond Becquerel) 首先发现。他发现电解液中镀银的白金电极之间在光照下会产



皮尔森（左），切宾（中），富勒（右）
图 1-2 晶体硅太阳能电池发明人

生光生电压，这个时间比爱迪生发明白炽灯更早。

1953 年，美国贝尔实验室研究人员达里尔·切宾（Daryl Chapin）、加尔文·富勒（Calvin Fuller）和吉拉德·皮尔森（Gerald Pearson）三位科学家在 Si 材料的研究中，发现在光照下 Si 会产生光伏效应，并研制成转换效率为 4.5% 的单晶硅太阳能电池，几个月后转换效率提高到 6%，从此开始了阳光发电能源的开发和应用历程。1958 年，美国和苏联相继将太阳能电池应用于航天工程，将其作为人造卫星电源。

1.2 阳光资源

1956 年，壳牌石油公司的哈伯特（M. King Hubbert）提出了著名的资源枯竭预测模型^[1]，称为哈伯特-高斯模型，并预测了石油生产的曲线，后来又进一步提出了多峰哈伯特模型。

哈伯特认为有限资源的寿命服从高斯曲线，通常用误差函数或正态曲线来描述，即

$$R(t) = R_m e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2s^2}} \quad (1-1)$$

式中， $R(t)$ 表示在给定时间 t 时刻的消耗率； t_0 表示初始时间； R_m 表示最大消耗率； s 表示曲线的形状因子。

根据哈伯特理论，当资源消耗 50% 时，消耗量达到最大值的水平位置。在曲线顶点附近的上升沿和下降沿都接近指数函数。除哈伯特模型外，还有其他能源资源消耗的预测模型。尽管各种模型预测的出现曲线峰值的年份有所差异，但差异并不太大。有限资源总是要消耗的，如果资源的消耗按固定速率增长，则消耗的速度是十分惊人的。例如，1970 年全世界石油的消耗总量为 1.67×10^{10} 桶（1 桶 = 5ft^3 ），按 1890—1970 年间的平均消耗速率 7% 计算，即使半径为 $6.4 \times 10^6\text{m}$ 的整个地球全部都是石油，也将在 344 年内消耗殆尽。^[2]

太阳能由太阳提供，太阳的辐射功率约为 $3.8 \times 10^{20}\text{MW}$ ，地面上所接收到的太阳能约为 $1.8 \times 10^{18}\text{kW} \cdot \text{h}$ ，而太阳的预测寿命约为 40 亿年，所以太阳能几乎是无限的。

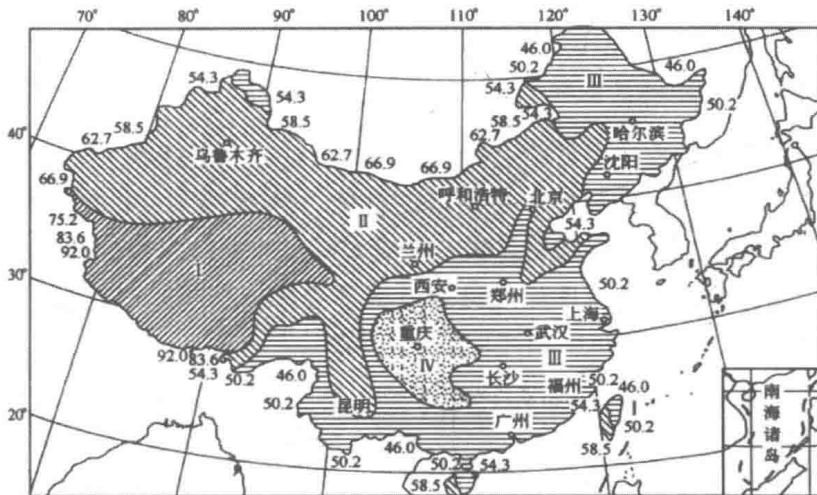
我国的矿物能源资源并不丰富，但太阳能资源比较丰富，全国总面积 2/3 以上地区年日照时数大于 2000h，年辐射量在 $5000\text{MJ}/\text{m}^2$ 以上。据统计资料分析，中国大陆面积每年接收的太阳辐射总量为 $3.3 \times 10^3 \sim 8.4 \times 10^3\text{MJ}/\text{m}^2$ 。

太阳能资源的分布情况，决定于各地的纬度、海拔及气候状况，我国各地区的太阳能资源的分布如图 1-3 所示。全国极大部分地区全年总辐射量的分布在 $80 \sim 200 \text{kcal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{年})$ 范围内。西藏、青海、新疆、甘肃和宁夏等地区属于高日照地区。青海及西藏地区最高，塔里木盆地经河西走廊至内蒙古高原也是高数值区；整个东部、南部及东北部则是中等数值区；四川盆地、两湖地区、秦巴山地是相对低数值区。全国地面太阳辐射资源分布通常分成四类地区，见表 1-1。其中，I、II 类地区的年日照时数不少于 2200h。太阳能资源丰富（年日照时数多于 2200h）的地区占全国总面积的 2/3 以上。

表 1-1 中国地面太阳辐射资源分布

资源区	等级	年总辐射量 (MJ/m^2)
I	最丰富带	6700 ~ 8370
II	很丰富带	5400 ~ 6700
III	较丰富带	4200 ~ 5400
IV	一般	< 4200

注：通常以全年总辐射量来表示，单位为 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 、 $\text{kcal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{年})$ 、 $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{cm}^2 \cdot \text{年})$ 或全年日照总时数。（ $1 \text{kW} \cdot \text{h} = 3.6 \text{MJ}$ ， $1 \text{cal} = 4.184 \text{J}$ 。）



I— $\geq 6700 \text{MJ}/\text{m}^2$ II— $5400 \sim 6700 \text{MJ}/\text{m}^2$ III— $4200 \sim 5400 \text{MJ}/\text{m}^2$ IV— $< 4200 \text{MJ}/\text{m}^2$

图 1-3 中国太阳能资源分布图

1.3 太阳能光伏发电系统

太阳能光伏发电系统是直接将太阳能转化为直流电能或交流电能的光伏电源或光伏电站^[3]，其输出功率可根据需要从数瓦至数百兆瓦不等。

1.3.1 太阳能光伏发电系统的结构

太阳能光伏发电系统由太阳电池和组件、控制器、逆变器和储能装置（蓄电池组）等部件组成。太阳能光伏发电系统的基本构成框图如图 1-4 所示。

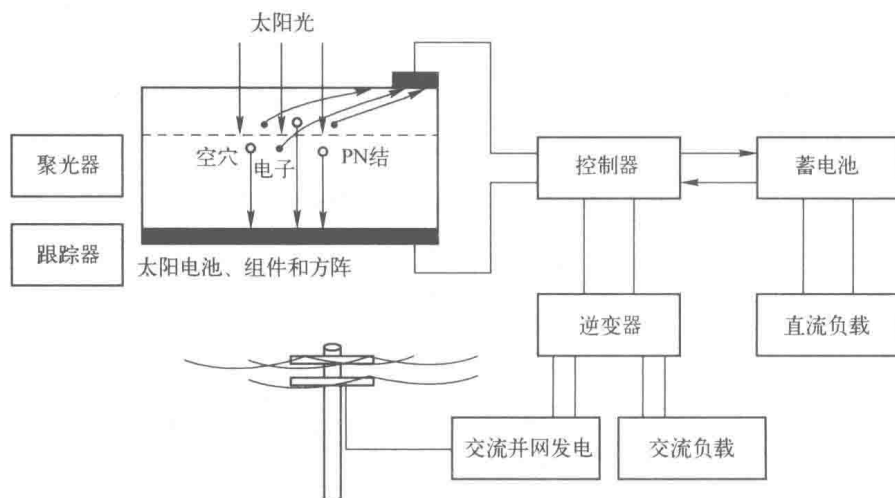


图 1-4 太阳能光伏发电系统的基本构成框图

1. 太阳电池和太阳电池组件

太阳电池的作用是直接将太阳能转换成电能，其工作原理基于半导体 PN 结的光生伏特效应。单体太阳电池电压较低（约 0.7V）、电流较小，实际使用时需要将单体电池按要求串联及并联，形成太阳电池组件（也称光伏组件），用于光伏电源。太阳电池组件按用户的负载需求（电压、功率）再进行串并联就构成了太阳电池方阵，用于光伏电站，如图 1-5 所示。

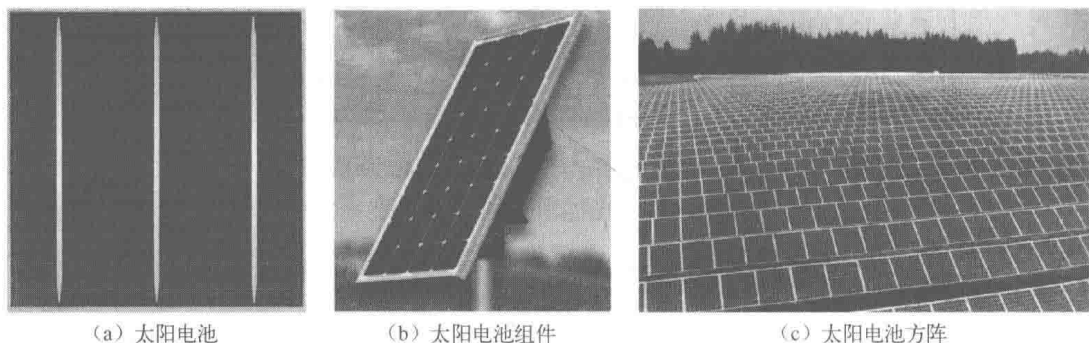


图 1-5 太阳电池、组件和方阵

1) 太阳电池

(1) 基本结构。现在用量最大的太阳电池是晶体硅太阳电池，包括单晶硅和

多晶硅两种太阳电池，占全球装机用量的90%以上。晶体硅太阳电池的基本结构是在P型晶硅片上扩散进磷杂质形成厚度约为 $0.5\mu\text{m}$ 的 N^+ 型扩散层，与P型基底构成PN结，结区附近的区域称为耗尽区。扩散层的表面沉积了一层减反射膜，扩散层表面进行丝网印刷并烧结一层栅状金属电极，栅状电极可以透过绝大部分入射光。栅状电极又分主栅电极和副栅电极，统称为顶电极，背面进行丝网印刷并烧结一层金属电极，称为背电极。太阳电池结构示意图如图1-6所示。

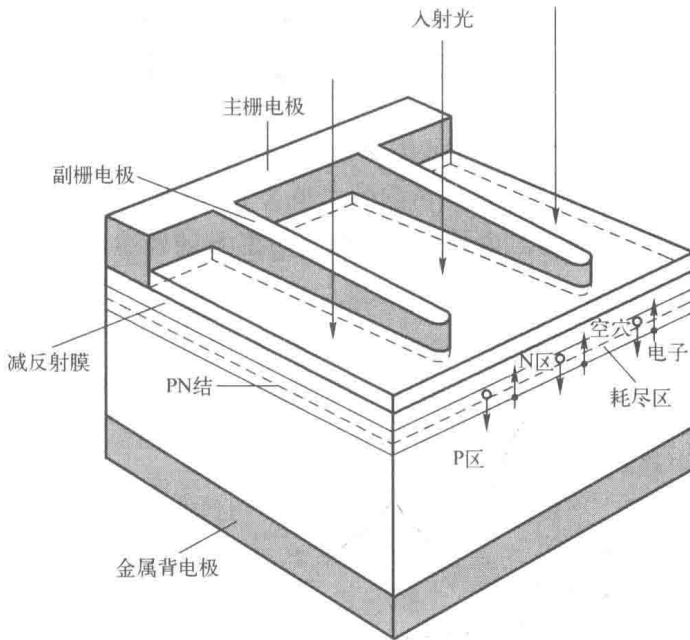


图1-6 太阳电池结构示意图

(2) 工作原理。当电池被照射时，光透过减反射膜进入硅晶体中，能量大于硅晶体禁带宽度的光子在N区、耗尽区和P区中激发出光生电子-空穴对。进入耗尽区以及在耗尽区内产生的光生电子-空穴对将立即被内建电场分离。光生电子进入N区，光生空穴进入P区。在N区中，扩散到PN结边界的光生空穴受到内建电场作用作漂移运动，越过耗尽区进入P区，光生电子则被留在N区。同样，P区中的光生电子先扩散、后漂移而进入N区，光生空穴留在P区。于是PN结两侧积累了正、负电荷，产生了光生电压。当接上外电路和负载时，就会在负载上流过光电流获得电能。

有光照时，硅太阳电池在短路状态下形成的光电流称为短路电流 I_{sc} ，在开路状态下电池两端形成的电压称为开路电压 U_{oc} 。短路电流随入射光的光强增加呈线性上升。开路电压随光强增加呈指数上升，在强光下趋于饱和。

太阳电池在光照下，接通负载后，光生电流流经负载，并在负载两端建立起端电压。

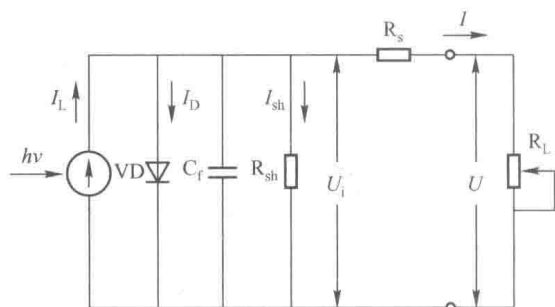


图 1-7 太阳能电池单二极管等效电路图

(3) 等效电路。太阳能电池在稳定光照下的工作情况可用等效电路表述。图 1-7 显示了太阳能电池的等效电路。它由以下电路元件构成：能稳定地产生光电流 I_L 的电流源、处于正偏压下的二极管 VD 、与 VD 并联的电阻 R_{sh} 、电容 C_f 以及与输出端串联的电阻 R_s 。光电流 I_L 提供二极管的正向电流 $I_D = I_0 [e^{U/(kT)} - 1]$ 、旁路电流 I_{sh}

和负载电流 I 。其中， A 为二极管曲线因子； k 为玻尔兹曼常数； T 为温度。

(4) 电池的输出功率。当流经负载的电流为 I 、负载两端的端电压为 U 时，根据太阳能电池的等效电路可得到电流为 I 和输出功率 P 的表达式：

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_0 \left[e^{(U - IR_s)/(kT)} - 1 \right] - \frac{I(R_s + R_L)}{R_{sh}} \quad (1-2)$$

$$P = IU = \left\{ I_L - I_0 \left[e^{(U - IR_s)/(kT)} - 1 \right] - \frac{I(R_s + R_L)}{R_{sh}} \right\} R_L \quad (1-3)$$

式中， I_0 为反向饱和电流。

在光照的情况下，当负载 R_L 从 0 变到 ∞ 时，可绘出如图 1-8 (a) 所示的太阳能电池负载特性曲线，调节 R_L 可获得最大功率 P_m 点，此时对应的电流和电压称为最佳工作电流 I_m 和最佳工作电压 U_m 。根据式 (1-2) 还可绘制出太阳能电池的输出功率 - 电压特性曲线，如图 1-8 (b) 所示。

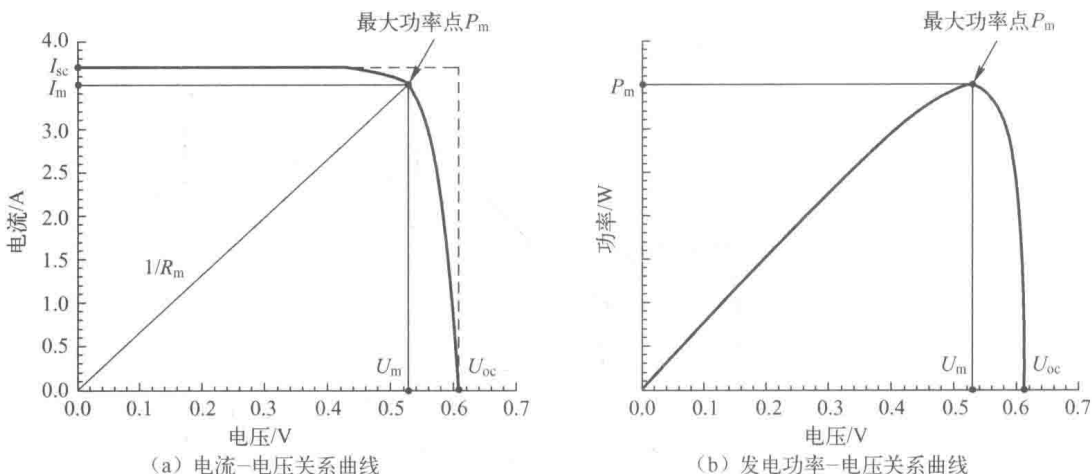


图 1-8 太阳能电池特性曲线

2) 太阳能电池的类别 太阳能电池的分类可有以下几种方式。

(1) 按制造太阳能电池的材料分类。

- ⊙ 元素半导体：主要是硅基太阳电池，即以硅半导体材料为基体的太阳电池，如单晶、多晶和非晶电池。
- ⊙ 化合物半导体：以化合物半导体材料为基体的太阳电池，如碲化镉（CdTe）太阳电池、铜铟镓硒（CIGS）太阳电池和砷化镓太阳电池等。
- ⊙ 有机太阳电池：如染料敏化太阳电池、高分子太阳电池等。

(2) 按结构分类。

- ⊙ 同质结太阳电池：由同一种半导体材料构成一个或多个 PN 结的电池，如晶体硅太阳电池、砷化镓太阳电池等。
- ⊙ 异质结太阳电池：用两种不同的半导体材料或同种材料不同结晶度，在相接的界面上构成一个异质结的太阳电池，如氧化铟锡/硅太阳电池、非晶硅/单晶硅太阳电池等。
- ⊙ 肖特基结太阳电池：用金属和半导体接触组成一个“肖特基势垒”的电池，也称 MS 电池，如导体-绝缘体-半导体（CIS）电池，这种电池又分为金属-氧化物-半导体电池（MOS）和金属-绝缘体-半导体电池（MIS）。广义地说，肖特基结太阳电池也属于异质结太阳电池。
- ⊙ 光电化学太阳电池：由浸于电解质中的半导体电极构成的太阳电池。

(3) 按太阳电池的基底形态分类。

- ⊙ 片状太阳电池，如单晶硅电池、多晶硅电池和砷化镓电池。
- ⊙ 薄膜太阳电池，如非晶硅电池、非晶硅/微晶硅叠层电池和铜铟镓硒太阳电池。

由于硅原材料丰富，基于半导体工艺的制造方法比较成熟，产业化生产的单晶硅电池效率已达到 20%，多晶硅电池达到 18.5%，而且随着电池结构、选用材料和制造工艺的改进，效率还在不断提高，制造成本还在继续下降。从发电成本上分析，电池的效率 and 组件的寿命有着十分重要的作用。按粗略估计，现有电池的效率每提高 1%，发电成本将下降约 7%；而组件寿命每提高 2 年，也可使发电成本下降约 7%。现在使用的太阳电池中 90% 以上是晶体硅太阳电池和组件。

薄膜太阳电池使用的半导体材料少，组件质量轻。有的薄膜电池制备工艺相对简单，使其成本可与晶体硅电池相当，甚至略低于晶体硅电池，如 CdTe 太阳电池。CIGS 太阳电池也已开始进入商业化生产阶段。

非晶硅太阳电池是最早实现产业化生产的薄膜太阳电池，历史上作为三种硅基太阳电池（单晶、多晶和非晶）之一，其产量曾占总产量的 17%，但是后来由于其光致衰减效应得不到很好的解决，限制了其大规模应用。多晶硅薄膜太阳电池可以减少硅材料用量，人们也为此做过不少努力。由于硅的熔点高（1412℃），如果沉积温度低，晶体生长速度慢，不能实现规模化生产；如果提高沉积温度，则需要采用高纯度的耐高温基底材料，这又增加了制造成本。因此，这类电池至今未能形

成规模化生产。现在对于硅基薄膜太阳能电池，多数研究工作集中在非晶/微晶叠层硅基薄膜太阳能电池的开发方面，希望在性能和制造成本方面达到可实际使用的水平。

一些新型电池，如染料敏化太阳能电池等也被认为是很有发展前景的太阳能电池。

3) 晶体硅太阳能电池组件 单体太阳能电池输出电压低（约为 $0.6 \sim 0.7\text{V}$ ），输出电流小，厚度薄（约为 $0.15 \sim 0.20\text{mm}$ ），性能脆，怕受潮，不适宜在通常的环境条件下工作。为了使太阳能电池能适应于实际环境条件，需要将单体太阳能电池串、并联后，用玻璃、EVA黏结胶膜、TPT背板进行封装保护，引出电极导线，制成数瓦到数百瓦不同输出功率的太阳能电池组件。

太阳能电池组件是太阳能光伏发电系统的核心部件，其性能优劣直接关系到光伏发电系统的效率、输出电能的质量和系统使用寿命，从而最终影响太阳能光伏发电系统的发电成本。

2. 变换器

太阳能电池及组件以直流方式输出电能，但是在很多情况下，用电系统都以交流供电。变换器的作用是将太阳能电池和蓄电池输出的直流电转换成与用电器相匹配的交流电或不同电压水平的直流电。变换器分为直流-交流（DC-AC）变换器和直流-直流（DC-DC）变换器。对变换器基本要求是：具有较高的变换效率和稳定的交、直流电压输出；具有一定的过载能力；在正弦逆变输出情况下，输出电压的波形失真度和频率偏差应控制在较低的范围等。

3. 控制器

在配备蓄电池的光伏发电系统中，控制器的主要作用是针对蓄电池的特性，对蓄电池的充放电进行控制，以延长蓄电池的使用寿命。对控制器的基本要求是：确定最佳充放电方式，有效存储电能；能按照预先设定的保护模式自动切断和恢复对蓄电池的充放电；需要时有多路充放电管理功能。控制器还应有自身保护功能，如防雷击、防反充等。

在不配备蓄电池的并网光伏发电系统中，控制器应具备电能的自动监测、控制、调节和转换等多种功能。

4. 储能装置

光伏发电系统中的储能装置用于负荷调节、电能质量调节和系统暂态补偿，分化学储能和物理储能两类。在独立光伏发电系统中，通常使用化学储能的蓄电池，是系统中必须配备的部件，主要用于储存光照下系统转换的电能，供给无光照（晚间或阴雨天）时使用。对这类蓄电池的基本要求是在深放电条件下的使用循环