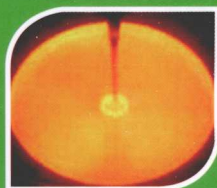
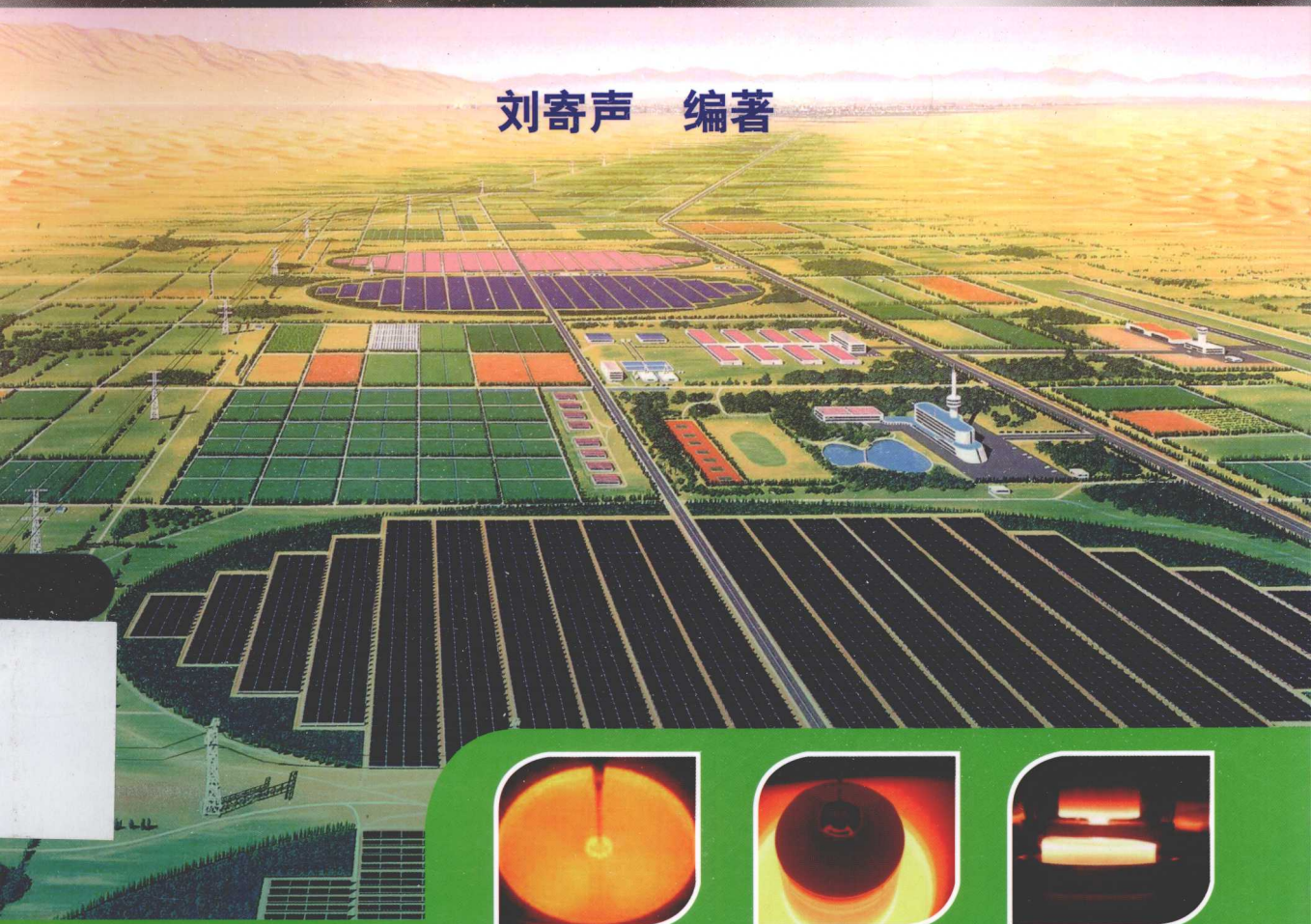


GUANGFU DIANCHI  
GUANJIAN ZHIZAO YU JIANCE JISHU WENDA

# 光伏电池

## 关键制造与检测技术问答

刘寄声 编著



化学工业出版社



GUANGFU DIANCHI  
GUANJIAN ZHIZAO YU JIANCE JISHU

# 光伏电池

## 关键制造与检测技术问答

刘寄声 编著



化学工业出版社

·北京·

本书所列是有关太阳能光伏电池生产企业人员应知和应会的关键制造技术、关键检测技术及基础理论问题等。编者除了根据多年的实践经验进行编写之外，还参考了国内外有关最新资料；同时列举了大量与光伏电池制造有关的工程实例。本书既有操作实践，又有基础理论；力求深入浅出，通俗易懂。

全书主要内容涵盖如下：有关光伏电池与太阳能的基础知识；有关半导体与材料的基础知识；有关光伏电池硅材料的关键制造技术，包括硅的还原、硅的化学提纯、硅的物理提纯、单晶硅的制备、多晶硅铸锭与切片等。还对有关光伏电池实际生产的最新关键制备技术、光伏电池生产的最新关键检测技术等进行了重点介绍。

本书适于广大太阳能生产企业工人、技术人员和管理人员参考，也适于新能源材料研究人员和技术人员参考，还可作为职业院校光伏专业教学参考书使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

光伏电池关键制造与检测技术问答/刘寄声编著.  
北京：化学工业出版社，2013.5  
ISBN 978-7-122-16841-2

I. ①光… II. ①刘… III. ①光电池-制造-问题  
解答②光电池-检测-问题解答 IV. ①TM914-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 058843 号

---

责任编辑：朱 彤  
责任校对：王素芹

文字编辑：王 琪  
装帧设计：刘丽华

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）  
印 装：大厂聚鑫印刷有限责任公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 15 字数 386 千字 2013 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：49.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

一般传统的发电技术发电需要庞大的蒸汽锅炉、复杂的发电机组和许多运转设备，同时需要消耗大量的化石能源，同时还要排放大量的有害气体。而光伏电池是直接将太阳光转换为电能，既不用锅炉，也没有复杂的设备，不消耗任何能源，没有日常的运行支出，不用水，不排放任何的有害气体，是一种廉价的发电技术。利用光伏电池发电也不会引发任何的环境问题，而且维护简单，容易实现自动化和无人化。

由于政府的大力支持，近几年我国的光伏产业就像雨后的春笋，发展特别迅猛，仅仅几年就从一个太阳能光伏产业比较落后的国家，一跃站到世界前列，成为全球第一大太阳能光伏电池生产大国。2000年，中国太阳能电池产量仅为3兆瓦，到2007年年底达到1088兆瓦，超过欧洲（1062.8兆瓦）和日本（920兆瓦），跃居世界第一位。

最近我国政府又加大了对太阳能光伏发电的支持力度，新出台了新能源振兴计划，而且还规定，对建筑一体化光伏系统（BIPV）项目，每焦瓦补贴20元人民币。可以想见，我国的太阳能光伏产业会在政府支持的东风吹动下，再次得以大幅度提高。由此看来，在我国，太阳能光伏发电的前途是光明的，而且会像太阳一样光明。可以相信，在不久的将来，我国一定会进入一个崭新的“太阳能时代”。

光伏电池是以最普通的砂石为原料制造的，其整个生产是一个复杂、庞大的系统工程。本书采用问答形式，所提出的多是有关光伏电池生产中的技术和理论问题。为了确保答案准确，问题解答时，多是根据多年的实际经验，并且参考了国内外有关文献给出，所以既有操作实践，又有基础理论，力求深入浅出，通俗易懂。

全书共分9章，第1章和第2章是介绍光伏电池与太阳能和半导体与材料的基础知识；第3章至第7章是介绍光伏电池材料的生产方法，即介绍普通的砂石是怎样变成可以生产光伏电池硅片的；第8章介绍怎样用硅片生产光伏电池；第9章介绍的是光伏电池整个生产过程中用到的检测技术。

由于编著者时间和精力所限，书中不妥之处在所难免。希望能得到各位读者的批评和指正。

编著者  
2013年3月

# 目 录

<b>第 1 章 光伏电池与太阳能的基础知识</b> .....		1
1-1	什么是太阳能? 什么是光伏电池? .....	1
1-2	光伏电池的种类有哪些? .....	2
1-3	世界光伏电池的发展是怎样的? .....	5
1-4	中国光伏电池的发展是怎样的? .....	5
1-5	光伏电池发电有哪些优点? .....	5
1-6	光伏电池发电有哪些局限性? .....	6
1-7	哪种光伏电池最好? .....	6
1-8	光有什么特性? .....	7
1-9	什么是外光电效应? 什么是内光电效应? .....	8
1-10	什么是光伏效应? 什么是 LED? .....	8
1-11	什么是光伏电池的输入输出特性曲线? .....	8
1-12	什么是填充因子? .....	9
1-13	怎样计算光伏电池的能量转换效率? .....	10
1-14	怎样通过功率来计算光伏电池的能量转换效率? .....	10
1-15	怎样通过转换效率计算光伏电池的功率? .....	10
1-16	光的照度对光伏电池的性能有何影响? .....	11
1-17	温度对光伏电池的性能有何影响? .....	11
1-18	电池片厚度对光伏电池的性能有何影响? .....	11
1-19	光伏电池的构造是怎样的? 光伏电池是怎样发电的? .....	12
1-20	生产光伏电池所用的材料主要有哪些? .....	12
1-21	什么是光伏电池的光谱特性? .....	13
1-22	光伏电池用的半导体材料为什么要有纯度要求? .....	13
1-23	多晶硅的纯度对光伏电池有什么影响? .....	14
1-24	我国的太阳能资源的分布是怎样的? .....	14
<b>第 2 章 半导体与材料的基础知识</b> .....		16
2-1	光伏电池为何要用半导体材料制造? .....	16
2-2	什么是本征半导体? 什么是杂质半导体? .....	16
2-3	什么是施主杂质? 什么是受主杂质? .....	17
2-4	什么是生产光伏电池最常用的半导体? .....	17
2-5	什么是晶胞? 什么是晶粒? .....	18
2-6	单晶硅属于哪种类型的晶体? .....	19
2-7	单晶硅和多晶硅有什么相同和不同? .....	19
2-8	什么是晶体缺陷? 晶体缺陷有哪几种? .....	20
2-9	晶体缺陷与光伏电池有什么关系? .....	21
2-10	什么是三维缺陷? .....	21
2-11	可以生产光伏电池的半导体材料有哪些? .....	23
2-12	什么是少子? 什么是少子寿命? .....	24
<b>第 3 章 硅的还原</b> .....		26
3-1	为什么说光伏电池是使用砂石生产的? .....	26
3-2	将二氧化硅还原成硅的方法有哪几种? .....	27
3-3	碳还原法的具体流程是怎样的? .....	29
3-4	碳还原法的化学反应是怎样的? .....	30

3-5 工业硅生产对硅石有哪些要求? .....	31	3-13 怎样选择电弧炉? .....	38
3-6 工业硅生产对还原剂有哪些要求? .....	32	3-14 怎样选择电极? 怎样计算电极的直径? .....	39
3-7 什么是蓝碳? .....	33	3-15 极心圆的直径怎样确定? .....	39
3-8 作为还原剂木炭有什么优势? .....	33	3-16 炉膛的内径和深度怎样确定? .....	40
3-9 什么是洗精煤? 什么是块状炉料? .....	34	3-17 怎样提高工业硅生产的热效率? .....	40
3-10 工业硅生产如何配料? .....	34	3-18 工业硅二次精炼的方法有哪几种? .....	41
3-11 工业硅生产中怎样进行加料、焖烧和捣炉? .....	35	3-19 工业硅的炉渣对产品有何影响? .....	42
3-12 什么是埋弧电炉? 埋弧电炉的电能传输是怎样的? .....	36	3-20 光伏电池生产对工业硅有哪些要求? .....	42

## 第4章 硅的化学提纯 ..... 43

4-1 工业硅中的杂质有哪些? .....	43	常出现的问题有哪些? .....	65
4-2 工业硅为何要提纯? 什么是超纯硅? .....	43	4-15 什么是塔板负荷性能图? 什么是塔板适宜操作区域图? .....	65
4-3 硅的化学提纯方法有哪几种? .....	43	4-16 对于有多种杂质的三氯氢硅怎样提纯? .....	68
4-4 多晶硅中的杂质是怎样表示的? .....	45	4-17 什么是提馏段和精馏段? .....	74
4-5 为何称三氯氢硅氢还原法为改良西门子法? .....	46	4-18 精馏塔有哪几种? .....	74
4-6 什么是氯化氢? 氯化氢是怎样合成的? .....	54	4-19 对精馏塔的材质有哪些要求? .....	79
4-7 什么是三氯氢硅? 三氯氢硅是怎样合成的? .....	56	4-20 对精馏塔的蒸发器和塔釜有哪些要求? .....	80
4-8 沸腾炉内为何还需要水冷? .....	59	4-21 对精馏塔的塔柱有哪些要求? .....	82
4-9 三氯氢硅合成为何要加铜和铝? .....	60	4-22 对精馏塔的塔头有哪些要求? .....	86
4-10 三氯氢硅中有哪些杂质? .....	60	4-23 什么是全回流? 什么是回流比? .....	87
4-11 三氯氢硅的提纯用什么方法? .....	61	4-24 一个完整的精馏车间是怎样的? .....	88
4-12 什么是常规精馏提纯法? .....	62	4-25 影响多晶硅产品质量的主要因素有哪些? .....	90
4-13 什么是拉乌尔定律? 什么是道尔顿分压定律? .....	63	4-26 还原炉为什么要用导热油? 为什么不能小看还原炉的冷却剂? .....	90
4-14 精馏塔的作用是什么? 精馏塔操作中		4-27 一个完整的还原车间是怎样的? .....	91

## 第5章 硅的物理提纯 ..... 93

5-1 什么是硅的物理提纯法? .....	93	5-9 影响酸洗效果的因素有哪些? .....	100
5-2 国外的物理法的工艺路径是怎样的? .....	94	5-10 为什么要吹气? .....	100
5-3 我国的物理法的工艺路径是怎样的? .....	96	5-11 为什么要造渣? 怎样选择造渣剂? .....	101
5-4 物理法生产多晶硅最难去除的是哪种杂质元素? .....	96	5-12 为什么要真空精炼? .....	101
5-5 为什么有人说物理法中也有化学反应? .....	97	5-13 电磁感应精炼有何好处? .....	103
5-6 物理法生产多晶硅的原料怎么处理? .....	97	5-14 电子束熔炼的原理是什么? 电子束枪对硅有何作用? .....	104
5-7 什么是炉外精炼? .....	98	5-15 什么是分凝系数? 什么是有效分凝系数? .....	105
5-8 什么是湿法冶金? .....	98	5-16 为什么要定向凝固? .....	107
		5-17 定向凝固的方法有哪几种? .....	108

## 第 6 章 单晶硅的制备 ..... 112

- 6-1 什么是单晶硅? 单晶硅有哪几种? ... 112
- 6-2 单晶硅的生产方法有哪几种? ..... 113
- 6-3 直拉单晶炉是怎样的? ..... 115
- 6-4 直拉法是怎样生产单晶硅的? ..... 117
- 6-5 什么是温度梯度? ..... 123
- 6-6 温度梯度对单晶硅生长有何影响? ... 125
- 6-7 硅液的流动对拉晶有何影响? ..... 127
- 6-8 拉晶时石英坩埚怎样升降? 单晶硅的生长量怎样计算? ..... 127
- 6-9 单晶硅中为何要掺杂? 掺杂量怎样确定? ..... 128
- 6-10 单晶硅中的杂质有什么作用? ..... 129
- 6-11 怎样降低直拉单晶硅中的杂质含量? ..... 131
- 6-12 区熔法是怎样生产单晶硅的? ..... 132
- 6-13 区熔法为何能提纯单晶硅? ..... 138
- 6-14 直拉单晶硅所用的石英坩埚为何要涂氢氧化钡? ..... 139
- 6-15 单晶硅生产时突然停电怎么办? ..... 139
- 6-16 单晶硅为什么发白? ..... 140
- 6-17 怎样评价单晶硅的质量? ..... 141
- 6-18 单晶硅生产对环境有什么要求? ..... 142

## 第 7 章 多晶硅铸锭与切片 ..... 144

- 7-1 多晶硅为什么要铸锭? 多晶硅铸锭与物理法生产多晶硅有什么不同? ..... 144
- 7-2 多晶硅铸锭用什么设备? ..... 144
- 7-3 多晶硅铸锭的具体流程是怎样的? ... 146
- 7-4 多晶硅铸锭对石英坩埚有什么要求? 多晶硅铸锭所用的石英坩埚为何是方形的? ... 147
- 7-5 多晶硅铸锭所用的石英坩埚为何要涂氮化硅? ..... 149
- 7-6 多晶硅铸锭为何要用氩气? ..... 150
- 7-7 单晶硅棒切片与多晶硅锭切片有何不同? ..... 150
- 7-8 切割机有哪些种类? ..... 152
- 7-9 怎样计算硅棒出片率? ..... 158
- 7-10 多线切割机是怎样切割硅片的? ..... 159
- 7-11 多线切割机的金属线震动对硅片有何影响? ..... 160
- 7-12 多线切割机中的放线轮与收线轮之间有什么关系? ..... 160
- 7-13 怎样控制多线切割机走线系统的张力? ..... 160
- 7-14 多线切割机切得的硅片为何还要进行处理? ..... 164

## 第 8 章 光伏电池的制备 ..... 165

- 8-1 光伏电池制备的工艺流程是怎样的? ... 165
- 8-2 生产光伏电池怎样选择硅片? ..... 166
- 8-3 光伏电池为何要制绒? ..... 168
- 8-4 怎样在硅片上制绒? ..... 169
- 8-5 在硅片上制备 PN 结的方法有哪些? ... 171
- 8-6 什么是扩散? 扩散需要什么条件? ..... 171
- 8-7 可在硅片上制备 PN 结的扩散法有哪些? ..... 172
- 8-8 怎样在 P 型硅片上扩散磷原子? ..... 175
- 8-9 怎样在 N 型硅片上扩散硼原子? ..... 177
- 8-10 什么是离子注入? ..... 178
- 8-11 可在硅片上制备 PN 结的外延法有哪些? ..... 179
- 8-12 什么是边缘刻蚀? ..... 180
- 8-13 怎样去除减反射玻璃? ..... 181
- 8-14 光伏电池表面为何要有减反射膜? ..... 182
- 8-15 减反射膜为何能使硅片表面光的反射损失减少呢? ..... 183
- 8-16 减反射膜的厚度应该是多少? ..... 185
- 8-17 可以成为减反射膜的材料有哪些? ..... 187
- 8-18 怎样来计算减反射膜的透光量? ..... 190
- 8-19 什么是 PECVD 法? ..... 191
- 8-20 双层减反射膜有何优势? ..... 194
- 8-21 光伏电池的电极是怎样制作的? ..... 195
- 8-22 光伏电池的电极为何还要进行烧结呢? 怎样烧结? ..... 199

## 第 9 章 光伏电池生产中的检测 ..... 201

- 9-1 光伏电池生产中的检测都包括哪些? ... 201
- 9-2 什么是方阻? 怎样测定方阻? ..... 203

9-3 使用四探针测量电阻怎样选择 电流? .....	205	9-10 硅片的厚度和厚度变化是怎样测 量的? .....	211
9-4 硅片测试对环境有何要求? .....	205	9-11 测量温度的仪表有哪些? .....	214
9-5 什么是无接触测试仪? .....	206	9-12 流量计有哪些? 什么是质量流 量计? .....	217
9-6 什么是 TTV? .....	206	9-13 什么是气相色谱仪? .....	221
9-7 怎样测量半导体的导电类型? .....	206	9-14 什么是质谱仪? .....	223
9-8 怎样测量半导体的少子寿命? .....	208		
9-9 怎样测量扩散结深? .....	209		

## 附录 ..... 226

附录 1 常用液体密度表 .....	226	纯度标准表 .....	227
附录 2 几种常用光伏电池材料物理性 质表 .....	226	附录 4 各行业所需氢气主要技术参数表 ..	227
附录 3 工业氢、超纯氢、高纯氢、纯氢的		附录 5 不锈钢材质对照表 .....	228

## 参考文献 ..... 230



# 第1章 光伏电池与 太阳能的基础知识

要想了解光伏电池的制造技术，就应该首先了解什么是太阳能和什么是光伏电池，并且清楚太阳能的一些规律和光伏电池的一些特性以及光伏电池的发展概况。这样，会有助于对光伏电池制造技术的进一步理解。

## 1-1 什么是太阳能？什么是光伏电池？

太阳能是来自地球外部天体的能源（主要是太阳）。在太阳的内部，连续不断地进行着核聚变反应，不停地释放出巨大的能量，并且不断向宇宙空间辐射能量。我们所在的地球是太阳系中的行星，自然也每时每刻都在吸收太阳辐射来的能量。从广义上讲，除光能、热能之外，地球上的风能、化学能、潮汐能、波浪能和水的势能都来源于太阳能。

太阳能是一种清洁、无污染、不会枯竭，而且是免费、无须回报的能源。人类对太阳能的利用主要集中在热能利用和发电两个方面。

根据目前的技术，太阳能发电有两种方法：一种是利用热能产生的水蒸气驱动发电机发电，简称热能发电（见图 1-1）；另一种就是光伏电池发电。

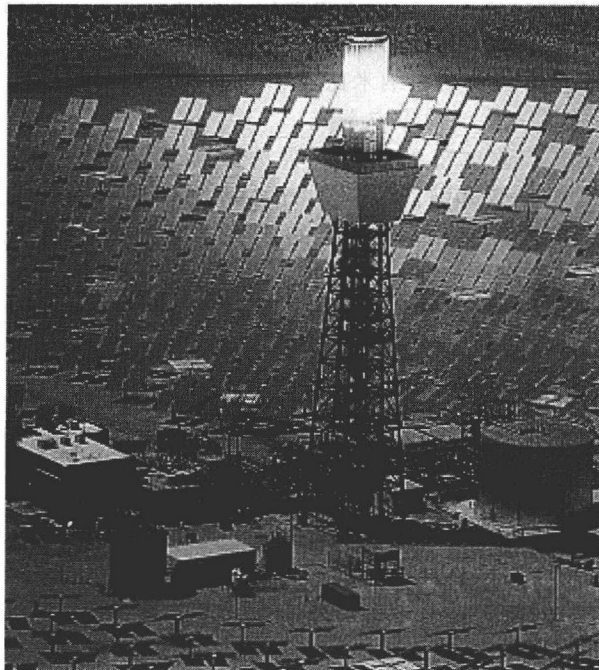


图 1-1 热能发电

什么是光伏电池？

光伏电池是太阳能光伏电池的简称，又称光电池或太阳能电池，是一种类似于晶体二极管的半导体器件，它是通过光电效应直接把太阳光能转化成电能的装置。光伏电池只要被光照到，瞬间就可以输出电压及电流（见图 1-2）。此现象在物理学上称为光生伏特效应，简称光伏。

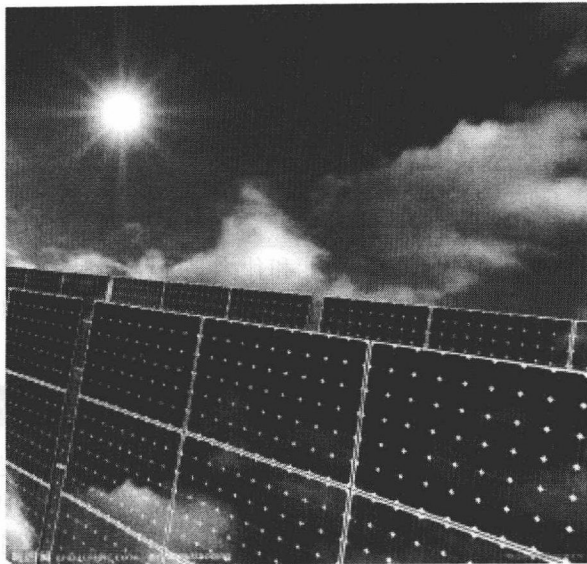


图 1-2 光伏电池

光伏电池的历史最早可追溯到 19 世纪。1839 年，光生伏特效应第一次由法国物理学家 A. E. 贝克勒尔（A. E. Becquerel）发现。

1883 年，第一块光伏电池由 Charles Fritts 制备成功。Charles 用锗半导体上覆上一层极薄的金层形成半导体金属结，器件只有 1% 的效率。

1946 年，Russell Ohl 申请了现代光伏电池的制造专利。

1954 年，在美国的贝尔实验室诞生了第一块实用的单晶硅光伏电池，其光电转换效率为 6%。

1960 年开始，美国发射的人造卫星就已经利用光伏电池作为能量的来源。

1970 年能源危机时，让世界各国认识到能源开发的重要性。1973 年发生石油危机，人们开始把光伏电池的应用转移到一般的民生用途上。

在美国、日本和以色列等国家，已经大量使用太阳能装置，更朝商业化的目标前进。在这些国家中，美国于 1983 年在加利福尼亚州建立了世界上最大的太阳能电厂，它的发电量可以高达 16 兆瓦。南非、博茨瓦纳、纳米比亚和非洲南部的其他国家也设立专项，鼓励偏远的乡村地区安装低成本的光伏电池发电系统。

在我国，太阳能发电产业也得到政府的大力鼓励和资助。2009 年 3 月，财政部宣布拟对太阳能光电建筑等大型太阳能工程进行补贴。自此，光伏电池像雨后春笋一样，在神州大地上得到了蓬勃发展，短短几年的工夫，我国已跨入光伏电池生产的大国行列。

近年来，太阳能光电技术有了明显的进步，研制成功的光伏电池已达 100 多种，但最多的还是采用硅晶体材料生产的光伏电池，占光伏电池总量的 90% 以上。近年来，光伏电池的光电转换效率也有了大的突破，一般都在 13% 以上，高的可达 20%。

## 1-2 光伏电池的种类有哪些？

自 1954 年美国的贝尔实验室诞生了第一块实用的单晶硅光伏电池至今已有近 60 年，在这期间，又诞生了多种不同材料和不同用途的光伏电池。光伏电池虽有这么多，我们可以按电池的结构或按所用的材料来分类。

按电池的结构来分，主要可分为三类：同质结光伏电池、异质结光伏电池和肖特基结光伏电池。

按所用的材料来分，主要可分为硅光伏电池和化合物光伏电池两大类（见图 1-3）。

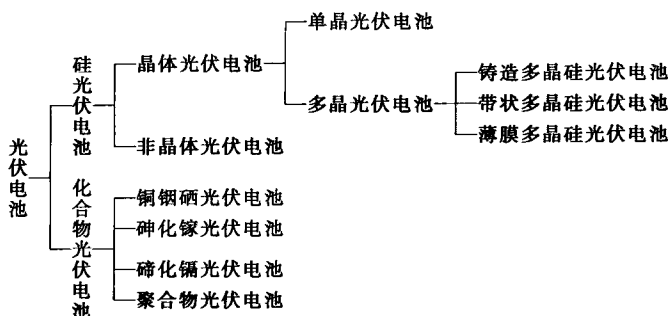


图 1-3 光伏电池按材料分类简图

(1) 硅光伏电池 硅光伏电池还可分为晶体硅光伏电池和非晶体硅光伏电池两类。

① 晶体硅光伏电池。还可再分为单晶硅光伏电池和多晶硅光伏电池两种。

a. 单晶硅光伏电池。是开发较早、转换效率最高和产量较大的一种光伏电池。目前单晶硅光伏电池转换效率在我国已经平均达到 16.5%，而实验室记录的最高转换效率超过 24.7%。这种光伏电池一般以高纯的单晶硅棒为原料，纯度要求 99.9999%。为了降低生产成本，现在地面应用的光伏电池采用太阳能级的单晶硅棒，材料性能指标有所放宽。有的也可使用半导体器件加工的头尾料和废次单晶硅材料，经过回炉拉制，可制成光伏电池专用的单晶硅棒。将单晶硅棒切成硅片，硅片厚度一般为 180~220 $\mu\text{m}$ 。硅片经过检测、清洗、制绒等工序后，再在表层上掺杂和扩散微量元素硼、磷、锑等，形成 PN 结，即具备了电池的基本特征。为了防止大量的光子被光滑的硅片表面反射掉，需要采用 PECVD 法等硅片表面上镀一层氮化硅减反射膜，同时还起到保护作用。然后经过去磷硅玻璃和等离子刻蚀后，采用丝网印刷法，将配制好的银浆印在硅片上做成栅线，同时制成背电极，再经过烧结工艺，就制成单晶硅光伏电池片。

b. 多晶硅光伏电池。是以多晶硅材料为基体的光伏电池。由于多晶硅材料多以浇铸代替单晶硅的拉制过程，因而生产时间缩短，制造成本大幅度降低。再加之单晶硅棒呈圆柱状，用此制作的光伏电池也是圆片，因而组成光伏组件后平面利用率较低。与单晶硅光伏电池相比，多晶硅光伏电池就显得具有一定竞争优势。但是，在多晶硅材料的生长过程中，由于热应力的作用，会在晶粒中产生大量的位错。再加上金属杂质和氧碳等杂质在位错上的聚集，会造成复合中心，使电学性能不均匀，因此会大大降低少数载流子寿命，影响光伏电池片的转换效率。多晶硅光伏电池的制造工艺和单晶硅光伏电池相差不大，所用的设备也基本相同，只是在制造多晶硅光伏电池时要尽量降低其晶界对光生载流子的复合损失。近年来，多晶硅电池片的研究和发展日新月异，经过采取磷和铝吸杂、氢气钝化和建立界面场等工艺措施，从而大大提高光伏电池的转换效率。目前，工业化生产的多晶硅电池转换效率达到 14%~16%。

随着科学技术进步、市场需求拉动和世界各国产业政策的引导，近年来，多晶硅光伏电池得到快速发展，同时出现多种新式的制造工艺。因此，按制造工艺分，多晶硅光伏电池又可分为铸造多晶硅光伏电池、带状多晶硅光伏电池和薄膜多晶硅光伏电池三种。

② 非晶硅光伏电池。是用非晶态硅为原料制成的一种新型薄膜电池。

非晶态硅是一种不定形晶体结构的半导体。用它制作的光伏电池只有 1 $\mu\text{m}$  厚度，相当于单晶硅光伏电池的 1/300。它的工艺制造过程与单晶硅和多晶硅相比大大简化，硅材料消耗少，单位电耗也降低很多。再加上它有弱光发电的优势，因而被广泛应用于电子计算机、电子钟表及复印机等方面。生产非晶硅电池一般采用 PECVD 法，主要工序有玻璃清洗、气

相沉积、激光刻线和磁控溅射等。为了解决非晶硅光伏电池在性能上的不足，人们开始研究一种叠层光伏电池。它是把不同禁带宽度的材料组合在一起，从而提高光谱的响应范围，减少衰减和提高转换效率。目前美国公司制得的单结光伏电池最高转换效率为 9.3%，三叠层电池最高转换效率为 13%。由于非晶硅光伏电池具有工艺简单、硅材料消耗少、成本低、重量轻、弱光发电、适应性强等特点，将成为最有发展前景的光伏发电材料。

(2) 化合物光伏电池 化合物光伏电池主要有铜铟硒光伏电池、砷化镓光伏电池、碲化镉光伏电池和聚合物光伏电池四种。

① 铜铟硒光伏电池。是以铜、铟、硒三元化合物半导体为基本材料，在玻璃或其他廉价衬底上沉积制成的半导体薄膜。由于铜铟硒电池光吸收性能好，所以膜厚只有单晶硅光伏电池的约 1/100。制备铜铟硒薄膜电池一般采用真空蒸镀法、硒化法和化学气相沉积法等工艺。其中，真空蒸镀法是采用各自的蒸发源蒸镀铜、铟和硒；硒化法是先蒸镀法或溅射法在 200~300℃ 较低温度下生成铜/铟层叠膜等，然后升温到 400~550℃，在硒化氢气体或硒蒸气中进行热处理，生成铜铟硒薄膜。铜铟硒薄膜电池具有材料消耗少、成本低、性能稳定和不存在光致衰退等特征。它的光电转换效率从 20 世纪 80 年代最初的 8% 已发展到目前的 15%，预计近年铜铟硒薄膜电池的转换效率将达到 20%。由于铜铟硒薄膜电池具有的自身优势，特别是光电转换效率目前居各种光伏电池之首等因素，因而被国际上称为未来的廉价光伏电池，吸引了众多机构及专家进行研究和开发。但铟和硒都是比较稀有的元素，制造这类电池将遇到原料制约的瓶颈因素，是投资者所必须充分考虑的。

② 砷化镓光伏电池。是一种 III-V 族化合物半导体光伏电池。与硅光伏电池相比，砷化镓光伏电池光电转换效率高，硅光伏电池理论效率为 23%，而单结砷化镓光伏电池的转换效率已经达到 27%；可制成薄膜和超薄型电池，同样吸收 95% 的太阳光，砷化镓光伏电池只需 5~10 $\mu\text{m}$  的厚度，而硅光伏电池则需大于 150 $\mu\text{m}$ ；耐高温性能好，200℃ 时，硅光伏电池已不能工作，而砷化镓光伏电池的效率仍有约 10%；可制成效率更高的多结叠层光伏电池，理论计算表明，双结砷化镓电池的极限效率为 30%，三结砷化镓电池的极限效率为 38%，四结砷化镓电池的极限效率为 41%。砷化镓光伏电池目前大多用液相外延方法或金属有机化学气相沉积技术制备，因此成本高，产量受到限制，再加上砷化镓材料的价格不菲，在很大程度上限制了砷化镓光伏电池的普及和发展。砷化镓光伏电池目前主要用在航天器上，是最理想的太空应用电池。由于它转换效率高和耐高温，也特别适合做成聚光跟踪发电系统，使其在地面应用上得到新的拓展。

③ 碲化镉光伏电池。碲化镉是一种化合物半导体，其带隙最适合于光电能量转换。用这种半导体做成的光伏电池有很高的理论转换效率，目前，已实际获得的最高转换效率达到 16.5%。碲化镉光伏电池通常在玻璃衬底上制造，玻璃上第一层为透明电极，其后的薄层分别为硫化镉、碲化镉和背电极，其背电极可以是碳浆料，也可以是金属薄层。碲化镉的沉积技术方法很多，如电化学沉积法、近空间升华法、近距离蒸气转运法、物理气相沉积法、丝网印刷法和喷涂法等。碲化镉层的厚度通常为 1.5~3 $\mu\text{m}$ ，而碲化镉对于光的吸收有 1.5 $\mu\text{m}$  的厚度也就足够。碲化镉光伏电池结构简单，容易沉积成大面积的薄膜，沉积速率也高。因此，碲化镉光伏电池的制造成本较低，是应用前景较好的一种新型光伏电池，已成为美国、德国、日本、意大利等国家研发的主要对象。但是有毒元素镉对环境的污染和对操作人员健康的危害是不容忽视的。目前专家正在积极研究对策，相信在不久的将来会得到解决，从而使碲化镉光伏电池成为未来社会新的能源之一。

④ 聚合物光伏电池。是利用不同氧化还原型聚合物的不同氧化还原电势，在导电材料表面进行多层复合，制成类似无机 PN 结的单向导电装置。聚合物光伏电池材料常见的有聚



乙烯、聚乙炔和聚对苯乙烯等。真正纯净的共轭聚合物是不导电的。要使它们表现出半导体特征，必须通过物理掺杂等工艺对聚合物进行离子注入，分别形成P型和N型结构。聚合物太阳能电池一般为三明治夹心结构，由导电玻璃（正极）、聚合物光活性层和Al（负极）组成。当光从某一侧照射活性层时，产生光伏效应形成电流。与结构复杂、成本高昂、光电电压受光强影响波动大的传统半导体光伏电池相比，聚合物光伏电池因其分子结构可以自行设计合成，材料选择余地大，加工容易，柔性好，毒性小，成本低等特点，从而对大规模利用太阳能、提供廉价电能具有重要意义。由于以聚合物制备光伏电池的研究才刚刚开始，不论是使用寿命，还是电池效率，都不能和无机材料特别是硅电池相比。能否发展成为具有实用意义的产品，还有待于进一步研究和探索。

### 1-3 世界光伏电池的发展是怎样的？

当世界电力、煤炭、石油等不可再生能源频频告急，能源问题日益成为制约国际社会经济发展的瓶颈。世界各国为实现能源和环境的可持续发展，均将光伏发电作为发展的重点，越来越多的国家开始实行“阳光计划”，开发太阳能资源，寻求经济发展的新动力。欧洲一些高水平的核研究机构也开始转向可再生能源。在国际光伏市场巨大潜力的推动下，各国的太阳能光伏电池制造业争相投入巨资，扩大生产，以争一席之地。

目前，全球光伏电池市场竞争激烈，欧洲和日本领先的格局已被打破。尽管主要的销售市场在欧洲，但太阳能光伏电池的生产重镇已经转移到亚洲。2011年，在光伏市场带动下，全球光伏电池产量持续增长，达到29.5GW/a。

### 1-4 中国光伏电池的发展是怎样的？

1958年我国开始研制光伏电池。1971年3月在我国发射的第二颗人造卫星上成功使用。1979年我国开始利用半导体工业废次硅材料生产单晶硅太阳能光伏电池。

近年来，在世界光伏市场的强力拉动下，我国的太阳能光伏电池制造业通过引进、消化、吸收和再创新，获得了长足的发展。1984年后我国开始大力研发太阳能光伏电池。进入21世纪，我国的太阳能光伏电池开始跨入产业发展期。在这之后，我国的太阳能光伏电池制造业像雨后春笋一样蓬勃发展。到了2006年，我国的光伏电池组件产量已占世界总产量的1/3以上，使我国成为世界最重要的光伏工业基地之一。

最近几年，我国的太阳能光伏电池制造业得益于国家对太阳能等新能源产业的政策、资金支持，所以产业规模不断扩大，产量不断升高。据统计，截至2010年年底，我国投产的电池组件企业已超过150家，电池组件总产能将超过22000MW，这与截至2009年全国组件已建成的产能（约为6500MW）相比，增长近2倍多。

目前，我国的太阳能光伏电池板和组件产量占世界总产量的一半左右，位于世界首位。而早在1995年就生产全世界40%的光伏电池板的美国在2010年仅占全球总产量的7%。到了2011年，在世界10大太阳能电池生产商中，就有6家是我们中国的企业。

### 1-5 光伏电池发电有哪些优点？

与常用的火力发电系统相比，光伏发电的优点主要体现在以下几个方面。

① 无枯竭危险，太阳能资源取之不尽，用之不竭，照射在地球上的太阳能要比当前人类消耗的能量大上上万倍，而且太阳能在地球上的分布广泛，只要有光照的地方就可以使用光伏发电系统，不受地域、海拔等因素的限制。

② 太阳能资源随处可得，可就地发电。不必长距离输电，避免了输电损失，节省了输

电成本。同时可以在那些远离传统发电基地的草原、高山、沙漠、海岛等地区大规模使用。

③ 光伏电池发电的能量转换简单，是直接由光子到电子的转换，没有中间过程和机械运动，不存在机械磨损。

④ 光伏电池发电无须消耗燃料，不排放任何废气，不污染环境，也不会产生任何的噪声，是一种真正绿色、环保的新型可再生能源。

⑤ 光伏电池发电不需要冷却水，可以安装在没有水的戈壁沙漠使用。

⑥ 光伏电池发电可以方便地与建筑结合，构成光伏建筑一体化发电系统，不需要单独占地，可以节省宝贵的土地资源。

⑦ 光伏电池发电没有中间过程和机械运动，基本上是自动运行，可以实现无人值守，因此，维护简单，运行成本低。

⑧ 光伏电池发电系统工作稳定可靠，使用寿命长，一般可达 39 年以上。

⑨ 光伏电池的结构简单，体积小，重量轻，便于运输和安装。光伏电池发电系统便于安装，建设周期短，而且极易组合，扩容方便，可以随时随地根据用电负荷调整其大小。

### 1-6 光伏电池发电有哪些局限性？

任何事物都有两面性，光伏电池也不例外，它的优点很多，但也有不足，也存在一些局限性。光伏电池发电的局限性主要表现在以下几个方面。

① 太阳能密度的局限。太阳投向地球的能量总和极其巨大，可以说是取之不尽，用之不竭，但由于地球的面积也很大，而且大部分面积被海洋占据，因此，分配到每个单位面积上的能量就不大了。再加上大气层的影响，真正能够到达地面的太阳的辐射能就更为可怜了。该能量值通常以太阳辐射照度来表示，地球表面的太阳辐射照度最高值约为  $1.2\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ，绝大多数地区在大多数的日照时间内都低于  $1\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 。

② 时间周期的局限。由于有太阳光照时，光伏电池才可以发电，所以光伏电池的发电受昼夜交替的影响，因此每天的黑夜就无法发电。而且一年当中春夏秋冬各个季节对发电负荷也有影响。夏天太阳光的辐射强，冬天太阳光的辐射弱，因此，季节变化也会引起光伏电池发电系统出力的变化。

③ 气候条件的局限。气候条件对光伏电池影响大，阴天、雾天、下雨、下雪等都会影响光伏电池的发电，从而会引起光伏电池发电系统出力下降，造成电力负荷的大幅度波动。

④ 转换效率的局限。与传统能源（矿物能源、石油、水能、核能等）的转换效率相比，光伏电池的转换效率太低。

由于太阳能密度、气候条件和转换效率等方面的局限，为了满足用电需要，不得不增加光伏电池的用量。这样一来，不仅电池的用量大，所占的面积大，而且建设的投资大，使用费用也高。这是阻碍光伏电池发电发展的最重要因素之一。

### 1-7 哪种光伏电池最好？

评价光伏电池的好坏，不能从单方面来看，而应对其进行多方面的综合分析。不仅要要看它的光电转换效率和稳定性，而且还要看它的工艺烦琐不烦琐，成本高不高，资源丰富不丰富等，除此之外，还要搞清楚它的材料有没有毒，环保不环保。

表 1-1 是各类光伏电池优缺点对比。从表 1-1 中可以看出各类光伏电池的对比情况：有的光伏电池的光电转换效率最高，但工艺烦琐，成本高；有的光伏电池材料成本低，但光电转换效率一般；有的光伏电池成本较低，工艺简单，但材料有剧毒，所以也不宜大量发展。

哪种光伏电池最好呢？表 1-1 中的几类光伏电池都有各自的优势，也都有各自的不足，

一句话,各有千秋。由于上述情况,我们很难从综合方面判断出哪类光伏电池最好,哪类光伏电池最不好。因此,我们只能从单一情况来判断光伏电池的优劣。

例如,单从光电转换效率方面来判断,单晶硅光伏电池的转换效率最高(16%~20%),多晶硅光伏电池的转换效率居中(14%~16%),非晶硅光伏电池的转换效率最低(5%~7%),因此,单从光电转换效率方面来判断,单晶硅光伏电池是最好的。

表 1-1 各类光伏电池优缺点对比

电池类型	材料及工艺	光电转换效率	材料环保性	电池稳定性
单晶硅光伏电池	工艺烦琐,成本高,但原材料资源丰富	最高	洁净	很高
多晶硅光伏电池	工艺和成本比单晶硅光伏电池低,原材料资源丰富	较高	洁净	高
多晶硅薄膜光伏电池	材料成本低,但工艺烦琐,而且不成熟	较高	洁净	很高
非晶硅薄膜光伏电池	材料成本低,但工艺烦琐,而且不成熟	一般	洁净	低
砷化镓光伏电池	材料成本低,但工艺烦琐	高	有剧毒	高
碲化镉光伏电池	成本较低,工艺简单,易大量生产	较高	有剧毒	较高
铜铟硒光伏电池	原材料资源短缺	较高	低污染性	较高
聚合物多层装饰性电极型光伏电池	材料成本低,但工艺尚不成熟	低	洁净	寿命短

目前,非晶硅薄膜光伏电池、砷化镓光伏电池、碲化镉光伏电池和聚合物多层装饰性电极型光伏电池都已实现了产业化生产,但技术还不是太成熟,有些还处于研发阶段。

晶体硅光伏电池的技术是比较成熟的,但最成熟的还是单晶硅光伏电池。当前,单晶硅光伏电池和多晶硅光伏电池的生产量占光伏电池生产总量的90%以上,是当今世界光伏电池产业的主导产品。

随着其他不同材料的不断发展,晶体硅光伏电池的所占比例会略微减小,但鉴于过去几十年晶体硅光伏电池技术的不断成熟,生产成本的不断降低,因此可以相信,未来晶体硅光伏电池仍会是光伏电池的主流。

## 1-8 光有什么特性?

光伏电池是将太阳的光能转化成为电能,也就是用光直接来发电的一种装置。因此,要了解光伏电池,就必须首先对光有所了解。

光是什么?光是人类最早认识的自然现象。光学也是物理学最早得到发展的学科之一。远在周朝,我国劳动人民用铜凹镜取火,用铜锡合金制成的镜子照人。公元前400年,《墨经》中记载了光的直线传播,平面镜、凸面镜和凹面镜成像。在宋朝,沈括在《梦溪笔谈》中对小孔成像,凸面镜和凹面镜成像,凹面镜的焦点做了详细的叙述。古希腊和古埃及对光学的研究也做出重要的贡献。17世纪初,荷兰物理学家李普塞、伽利略和开普勒创造了用于天文观测的望远镜(对掌握研究行星运动规律起了决定性作用)。1621年,斯涅耳发现了光传播到两种介质交界面时,光线传播方向发生改变的光的折射定律。

以上是人类对光的直线传播、反射和折射现象的认识、应用。在此基础上人类不难提出光是什么的疑问。从此,人类对光的研究进入了光的本性研究的时代。

光的本性是什么?人类对光的本性不是一下就认识的,而是经过了很长时间的研究和实践,逐步认识的。

1905年,美国科学家爱因斯坦解释了光电效应现象,是在德国科学家普朗克的量子理论启发下做出的。他认为,既然电磁波在辐射能量时是不连续的,是一份一份的,而每一份电磁波的能量 $E=h\nu$ ,式中, $h$ 为普朗克常量, $\nu$ 为电磁波的频率。而光波又是电磁波,故

爱因斯坦大胆提出，光的传播也是不连续的，是一份一份的，每一份光称为一个光子，光子能量  $E=h\nu$ ， $\nu$  为光子的频率，也是光的频率， $h$  仍然为普朗克常量。这一理论称为光子说。光子说成功解释了光电效应，并且有力证明了光具有粒子性。

光的所有现象告诉我们，从宏观现象中总结出来的经典理论，对微观粒子不再适用。宏观概念中波和粒子是完全对立的，而光波不是宏观概念中的波，光子也不是宏观概念中的实物粒子。所以，光的波动性和粒子性不仅仅只是对立的，二者是统一的。大量光子显示出光的波动性，少量光子显示出光的粒子性；光在传播过程中显示出光的波动性，光与物质相互作用时，显示出光的粒子性。可见光既具有波动性，又具有粒子性。即光具有波粒二象性。

光并不是连续的能量流，而是以单个、互不联系、一份一份的形式（即一个一个光子）来辐射和传播的。每个光子都是一个能量的载体。

光子的能量越大，即频率越高，其粒子性表现得越明显；而光子的能量越小，即频率越低，其波动性表现得越明显。其实，不但光子具有波粒二象性，而且一切微观粒子都具有波粒二象性。因此，现代物理学认为，微观粒子的规律不再用经典物理理论解释，而是用继普朗克量子理论之后建立的量子力学去解释。

### 1-9 什么是外光电效应？什么是内光电效应？

当光照射在某种金属表面上，一部分光子被表面反射，另一部分光子则被金属吸收。被吸收的光子将自己的能量交给金属的晶格和自由电子，则晶格振动的振幅增加，使自由电子的无序运动迅速加快。如果光子的能量大，等于或大于金属的束缚力，则电子便可以逸出金属表面。这种现象称为外光电效应。如果光子的能量小于金属的束缚力，则这部分能量最终将完全用来加热金属。光电管、光电倍增管等就是基于外光电效应制成的光电元件。

当光照射在某种金属和绝缘体之间的某些半导体材料时，半导体内部的自由电子-空穴对的数量便会迅速增加，这是由于某些光子的能量足以使电子摆脱原子的束缚并把电子由满带激发到导带中去，这种现象称为内光电效应。

### 1-10 什么是光伏效应？什么是 LED？

光伏效应就是因为光照时，半导体内部的自由电子-空穴对的数量增加而形成的，所以就是一种内光电效应。目前，根据光电效应制成的半导体光电元件可分为两大类：一类是利用“光电导效应”，即按光照时半导体的电导率发生变化的规律制成的光敏电阻；另一类就是可以将光能转变为电能的光伏电池。

LED 就是发光二极管，是英文 light emitting diode 的缩写。发光二极管是一种能够直接将电能转化为可见光的固态的半导体器件，被誉为 21 世纪的新型光源，具有效率高、寿命长、不易破损等传统光源无法与之相比的优点。发光二极管的发光原理与光伏电池的发电原理正好相反，光伏电池的发电原理是依靠半导体材料的光伏效应，将光转变为电能，而发光二极管也是依靠半导体材料的光伏效应，但它不是将光转变为电能，而正好相反，是将电能转变为光。严格来说，它依靠的不应是光伏效应，而应是“伏光效应”，也可以称为电致发光效应。

### 1-11 什么是光伏电池的输入输出特性曲线？

光伏电池的输入输出特性曲线，是反映当太阳光照射到光伏电池片上时，光伏电池的输出电压、电流及输出功率的关系的曲线。该图中是用  $I$  表示电流，用  $V$  表示电压，因此，该曲线也被称为光伏电池的  $I-V$  特性曲线。



图 1-4 是光伏电池的输入输出特性曲线。

光伏电池的种类较多，大小不一，怎样来衡量它们的光电转换能力呢？通过输入输出特性曲线就可以看出光伏电池的光电转换能力的强与弱，从而也就可以衡量出一个光伏电池的好与坏。

在光伏电池的输入输出特性曲线中的几个主要性能参数如下。

(1) **短路电流 ( $I_{sc}$ )** 当光伏电池的正负极短路时， $V=0$ ，此时的电流就是光伏电池的短路电流，其单位是 A（安培），短路电流随着光强度的变化而变化。另外，光伏电池单位面积的电流称为短路电流密度，其单位是  $A/m^2$  或  $mA/mm^2$ 。

(2) **开路电压 ( $V_{oc}$ )** 当光伏电池的正负极不接负载，处于开路状态，此时光伏电池正负极间的电压就是开路电压，开路电压的单位是 V（伏特）。单片光伏电池的开路电压不随电池片面积的增减而变化，一般为  $0.5\sim 0.7V$ ，当用多个光伏电池片串联时可以获得较高的电压。

(3) **峰值电流 ( $I_m$ )** 峰值电流也称最大工作电流或最佳工作电流，顾名思义就是光伏电池输出最大功率时的工作电流，其单位是 A。

(4) **峰值电压 ( $V_m$ )** 峰值电压也称最大工作电压或最佳工作电压，也就是光伏电池输出最大功率时的工作电压，其单位是 V。峰值电压不随光伏电池片面积的增减而变化，一般为  $0.45\sim 0.55V$ ，典型值是  $0.48V$ 。

(5) **峰值功率 ( $P_m$ )** 峰值功率也称最大输出功率或最佳输出功率，是指光伏电池正常工作或测试条件下的最佳输出功率，也就是峰值电流与峰值电压的乘积，其单位是  $W_P$ （峰瓦）。光伏电池的峰值功率取决于太阳辐照度、太阳光谱分布和光伏电池的工作温度，因此，光伏电池的测量要在标准条件下进行，测量标准为欧洲委员会的 101 号标准，其条件是： $1000W/m^2$  或  $100mW/cm^2$ ；光谱 AM1.5；测试温度  $25^\circ C$ 。

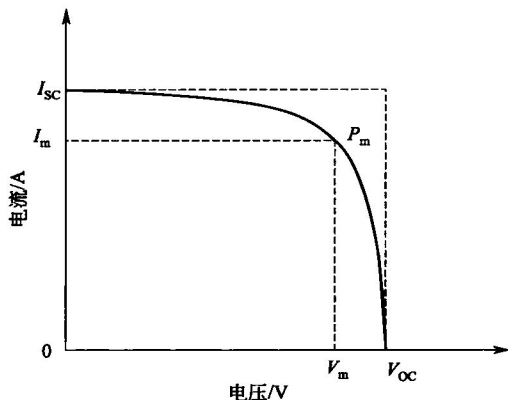


图 1-4 光伏电池的输入输出特性曲线

## 1-12 什么是填充因子？

填充因子也称曲线因子，用  $FF$  表示。填充因子是指图 1-5 中阴影部分的矩形面积 ( $I_m V_m$ ) 与虚线部分的矩形面积 ( $I_{sc} V_{oc}$ ) 之比，也就是光伏电池的峰值输出功率与开路电压和短路电流乘积的比值：

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (1-1)$$

填充因子是一个无单位的量，是评价和衡量光伏电池输出特性好坏的一个重要参数，它可以反映太阳能电池的质量，其值越高，表明光伏电池的输出特性越趋于矩形，光伏电池的光电转换效率越高。

填充因子的值都小于 1，一般为  $0.6\sim 0.8$ ，也可以用百分数表示。填充因子大于 0.7

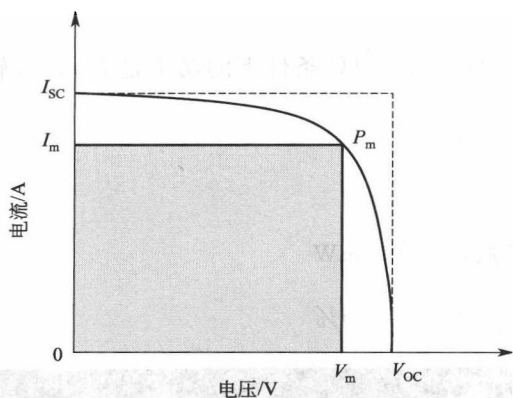


图 1-5 填充因子