

新能源开发与利用丛书

太阳能制造 光伏组件的环境设计概念

Solar Manufacturing
Environmental Design Concepts for Solar Modules

[美] 米歇尔·波利斯凯 (Michelle Poliskie) 著
何嵩 李梅香 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

关于本书

《太阳能制造：光伏组件的环境设计概念》阐述了当今领先的光伏企业采用的可持续发展方法。本书在回顾了各种光伏技术并给出可持续发展概述以后，描述了如何将可持续发展方法应用到光伏组件中。本书描述了纳入法规中的指标，以及法规如何设置市场准入门槛，同时讨论了用于改善光伏组件环境影响的创新产品发展趋势。

本书主要包括：

- ▶ 光伏技术介绍；
- ▶ 光伏产业可持续发展的动力；
- ▶ 光伏企业的环境指标和案例计算；
- ▶ 贸易壁垒的环境法规；
- ▶ 提高光伏组件环境可持续性的当前趋势；
- ▶ 行业中常用的术语和简称。

新能源开发与利用丛书

太阳能制造：光伏组件 的环境设计概念

[美] 米歇尔·波利斯凯 (Michelle Poliskie) 著
何 嵩 李梅香 译



机械工业出版社

本书是特别针对太阳能光伏行业在发展了十几年后出现和需要解决的长期可持续发展(环保)而专门撰写的。本书从技术的角度全面地分析了电池和组件原材料在生产和回收过程中对环境的影响,以及光伏组件在国际贸易中由于环保因素而面临的市场准入门槛,如欧盟和美国的环保法规带来的贸易壁垒等。

本书对从事光伏行业的各类人群都有一定的参考价值,如管理人员、工程师、市场推广人员等。书中介绍的知识可以帮助光伏行业的从业人员了解环保因素带来的对光伏组件更高更多的技术方面的要求,从而可以增强企业的可持续发展能力。

译者序

太阳能光伏行业如火如荼地发展十几年了，发展初期，行业普遍对如何提高光电转换效率和降低生产成本更加关注，这和企业收益直接相关。大多数的太阳能光伏技术书籍也是主要在讲述这方面的知识。如今，作为绿色产业，人们对光伏组件在生产和回收过程中可能产生的污染也逐渐重视起来。

本书全面地介绍了光伏组件在环保过程中面临的技术和法规等议题。这是本书和其他光伏技术书籍最大的不同之处，值得引进出版，供业内人士参考。

本书是特别针对太阳能光伏行业在发展了十几年后出现和需要解决的长期可持续发展（环保）而专门撰写的。本书从技术的角度全面地分析了电池和组件原材料在生产和回收过程中对环境的影响，以及光伏组件在国际贸易中由于环保因素而面临的市场准入门槛，如欧盟和美国的环保法规带来的贸易壁垒等。

本书对从事光伏行业的各类人群都有一定的参考价值，如管理人员、工程师、市场推广人员等。书中介绍的知识可以帮助光伏行业的从业人员了解环保因素带来的对光伏组件更高更多的技术方面的要求，从而可以增强企业的可持续发展能力。

感谢厦门大学能源学院的骈麒麟、裴怡茹、熊贝妮和刘星雨同学对翻译本书所提供的帮助。

译者

原书前言

全球变暖已经是科学界和政界大规模辩论的话题。每年，新的报告都会重新引起讨论并产生持续冲突。在 2011 年 11 月，这种辩论再一次加强。一份由世界气象组织（WMO）提供的报告促使温室气体和全球变暖议题再次成为公众关注的焦点。在 2011 年 11 月 21 日，WMO 提供的一份“Green Gas Bulletin（温室气体公告）”中提到二氧化碳的浓度相比于工业化前提高了 39%。这份报告同时指出，就算是处于全球经济危机的 2009 ~ 2010 年，温室气体也上升了 1.4%^[1,2]。主要的排放源是用于生产能源的化石燃料燃烧。

尽管减少二氧化碳的效果受到了争议，但光伏发电还是被广泛地认为比化石燃料具有更少的碳足迹。这项声明是光伏企业提升市场空间的核心价值主张。然而客户不可能仅仅由于光伏的环保益处而购买光伏组件，他们通常会选择具有更多价值的相同价格的产品。

在过去，客户会乐于见到更多的低价光伏组件产品。然而，低价竞争导致大量的光伏企业由于无法降低生产成本而倒闭。由于能源独立的战略重要性，故没有政府愿意单一的依靠国外制造的进口光伏组件。因此，越来越多的政府机构寻求保护本国市场被国外产品倾销的手段。策略之一就是制定规则和补贴来提高产品的市场准入门槛。比如，一些欧洲国家要求有最低的能量回收时间和具体的组件碳足迹来达到政府补贴的要求。

全球光伏安装量从 2000 年的 1.5GW 上升到 2011 年的 65GW^[3]。快速增长的光伏安装量引起了公众对可能没有正确处理光伏工业产生的新废弃物的担心。光伏安装量的快速增长可能导致破损旧组件的不恰当处理、环境的污染以及流向海外。尽管这种情况还没有在光伏工业中出现，但是已经在电子工业中出现。为了防止电子工业中出现的这些问题，奥巴马总统签署法令规定 2010 年 11 月 15 日为美国回收日。这项法令同时要求组成一个政府行动机构来报告并提出联邦政策，以改善与回收相关的环境可持续性。尽管目前重点不在光伏工业，但是随着光伏行业的成熟很有可能会被包括在现有法规内。

光伏和电子行业在欧洲环境法规中已经被捆绑在一起了。在被排除在欧洲废弃电子电气设备（WEEE）指令数年后，在 2012 年 1 月 18 日，欧洲委员会通过提议把光伏行业加入了这个指令。这项指令促使光伏企业直接负责组件废弃时的回收工作。这个计划的一个重要内容就是保障消费者了解光伏组件可以也应该被

负责任地回收。这些增加的责任包括教育拓展，报告与回收会增加光伏企业的运营成本，因此会削弱与传统能源（如化石燃料）的竞争力。但是，如果法案延迟光伏行业的纳入，那么光伏对环境的害处将大于益处。毕竟，如此前所述，传统能源已被证明对环境质量有威胁，然而光伏还是个没有确定和预见的威胁。

可通过增强市场竞争和加大法规压力迫使光伏企业为环境可持续发展策略制定程序。本书描述可持续发展概念和光伏企业采用的方法。前两章让读者熟悉不同的光伏技术并提供可持续发展的总体介绍。第3章讲述如何将可持续发展指标运用到光伏组件。第4章讨论这些指标是如何运用到环境法规中，以及运用法规产生市场准入壁垒的手段。最后一章讨论当前提高光伏组件环境价值的产品开发趋势。

参考文献

1. World Meteorological Organization. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*. Geneva: WMO, November 7, 2011.
2. World Meteorological Organization. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*. Geneva: WMO, November 6, 2010.
3. International Energy Agency. "Topic: Solar (PV and CSP)." IEA, Paris, July 31, 2012. www.iea.org

致 谢

首先感谢 James Lambert 博士为本书各章节提供的技术支持和文字润色。

之后，十分感谢父母牺牲了他们的一些梦想来成全我对梦想的追逐。感谢我的哥哥一直支持我不断挑战在当时看来似乎是不可能的事情。

Michelle Poliskie

目 录

译者序
原书前言
致谢

第 1 章 光伏组件介绍	1
1.1 光伏电池类型	1
1.1.1 从光伏电池中产生电力	1
1.1.2 优化光伏电池的电学性能	3
1.2 晶体硅光伏电池介绍	6
1.2.1 硅光伏电池的质量要求	7
1.2.2 硅光伏电池制造的环境考虑	14
1.2.3 硅和采煤之间危害的比较	16
1.3 薄膜光伏电池介绍	17
1.3.1 非晶硅电池的制造工艺	19
1.3.2 碲化镉电池的制造工艺	19
1.3.3 薄膜制造的环境考虑	20
1.4 聚光光伏中的多结电池	21
1.5 组件制造	22
1.5.1 平板组件制造	23
1.5.2 聚光光伏组件制造	27
1.6 系统平衡介绍	27
1.6.1 屋顶安装系统	29
1.6.2 地面安装	30
1.6.3 平板和聚光光伏组件的跟踪器	30
1.6.4 系统平衡的环境影响	31
参考文献	33
第 2 章 光伏产业可持续发展的动力	36
2.1 马尔萨斯困境	37
2.2 全球气候变化和能源资源之间的关联	39

2.3 能源来源和国家电网的混合	42
2.4 光伏材料的约束	45
2.5 光伏企业的可持续发展部门	48
参考文献	50

第3章 光伏企业的环境可持续发展指标 53

3.1 光伏组件未来回收市场	54
3.2 光伏组件回收技术	55
3.2.1 晶体硅组件的回收	57
3.2.2 碲化镉组件的回收	57
3.2.3 铜铟镓硒组件的回收	58
3.3 组件回收的成本	59
3.4 工业联盟：行业对回收的回应	61
3.5 环境管理体系	61
3.5.1 国际标准化组织认证	62
3.5.2 生态管理和审计计划	64
3.6 生命周期评估介绍	65
3.6.1 生命周期评估的目标和范围	66
3.6.2 生命周期清单	68
3.6.3 生命周期影响评估	70
3.6.4 解读	75
3.6.5 光伏生命周期评估指南	75
3.6.6 生命周期评估软件	78
3.6.7 环境产品声明	79
3.7 建筑规范	80
3.7.1 领先能源与环境设计介绍	80
3.7.2 建筑研究院环境评估方法介绍	84
参考文献	86

第4章 贸易壁垒的环境法规 90

4.1 美国的环境政策	90
4.1.1 美国《清洁空气法》	92
4.1.2 美国《清洁水法》	92
4.1.3 美国《固体废物处理法》	93
4.1.4 美国《濒危物种法》	95
4.1.5 政策改进方法	96

4.2 美国危险废物条例	97
4.2.1 浸出协议的类型	99
4.2.2 美国废物描述协议	101
4.2.3 光伏组件和美国废物描述协议	104
4.3 欧盟的废物描述和规定	105
4.4 美国的包装指令	107
4.5 欧盟的包装指令	108
4.6 光伏组件制造商和包装指令	109
4.7 有害物质限制指令	110
4.8 化学品的注册、评估、授权和限制	111
4.9 电子电气废物指令	117
4.10 环境法规的全球一致性	118
参考文献	119

第5章 提高光伏组件环境可持续性的当前趋势 122

5.1 可持续设计与使用	124
5.2 使用廉价聚合物部件的趋势	126
5.2.1 光伏组件中使用的聚合物的环境影响	129
5.3 消除光伏电池的限制要素	131
5.4 无边框光伏组件的环境改善	133
5.5 可回收利用的光伏组件	134
5.6 晶体硅电池制造中的浆料回收	137
5.7 光伏组件覆盖物的玻璃回收	137
参考文献	139

附录 142

附录 A 通用量度和国际单位制	142
附录 B 常用的单位换算	142
附录 C 光伏制造商的 AHP 计算实例	143
附录 D 美国危险废物的定义和特点	146
附录 E 全球环境监管机构	147
附录 F 相关的行业和组织缩写	148
附录 G 美国重要的环境法规	152
附录 H 欧盟重要的环境法规	154
附录 I 常用的光伏性能特性	155
附录 J 光伏组件的生命周期评估案例	157



X 太阳能制造：光伏组件的环境设计概念

附录 K 各种光伏技术的生命周期评估结果 165

附录 L 部分温室气体的全球变暖潜能值 172

附录 M SPI 树脂识别代码..... 172

附录 N 术语汇编 172

第 1 章

光伏组件介绍

全球安装的光伏发电量有所增加，从 2000 年的约 1.5GW 到 2011 年的 65GW^[1,2]。光伏组件的快速部署已引起利益相关者质疑行业是否花时间避免化学品对工人、环境和客户的危害^[3-5]。无论这是不是有效的关注点，因为行业尚未成熟，这都是实现最佳环境管理实践的适时机。

本书的范围仅限于对光伏组件的危害识别和风险管理及与环境毒理学有关的策略。光伏组件的暴露潜力和生态毒理学是业界制定环保战略要考虑的主要指标。环境危害和适当的安全措施针对光伏电池组成和相关的制造活动。所以，彻底地回顾一下光伏技术对于接下来的讨论是很恰当的。

1.1 光伏电池类型

任何光伏组件的唯一功能都是将入射阳光转换为电力。这种机制发生在组件内嵌入的光伏电池中。电池由前面接触、半导体材料和背面接触组成。半导体材料有时被称为活性层，因为它负责发电。半导体前后接触由携带电子的导电金属组成，并为连接的负载供电。没有接触，不可能将电子从活性半导体层引出。因为光伏电池是光伏组件的核心，所以可以使用电池的化学类型来定义每种光伏技术。而晶体硅和薄膜是平板组件电池中两个最普遍的技术。

2011 年，晶体硅技术占据世界光伏市场的 80% ~ 90%，而薄膜占据剩余的大部分市场^[6]。晶体硅半导体（c-Si）化学可以进一步细分为单晶硅（sc-Si）和多晶硅（pc-Si）技术。单晶电池占据最大的工业部分。薄膜是指与硅电池相比更薄的光伏电池。相比而言，大多数薄膜是晶体硅电池厚度的 1/100。根据全球生产量，主要的薄膜技术包括碲化镉（CdTe）、非晶硅（a-Si）、铜铟二硒化合物（CIS）和铜铟镓二硒化合物（CIGS）（见图 1.1）。

1.1.1 从光伏电池中产生电力

尽管上述光伏电池的化学成分不同，但它们都可以被定义为半导体材料。半

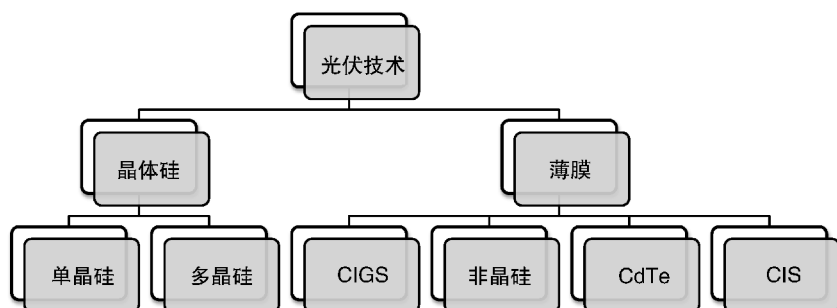


图 1.1 光伏技术分类

导体是表现物理性质的材料，介于绝缘体和导体之间。在一个亚原子水平，半导体的特征在于能隙在导电带和价带之间。能带是一个通常没有电子存在的量子化能级，通常称为带隙 E_g 。在这种情况下，带隙定义为发电所需的光波长。入射光能量等于或高于带隙可导致电子从价带跃迁到导带。一旦入射光将电子从原子轨道中激发出去，会留下一个空穴（见图 1.2）。电子和相应的空穴都是载流子。

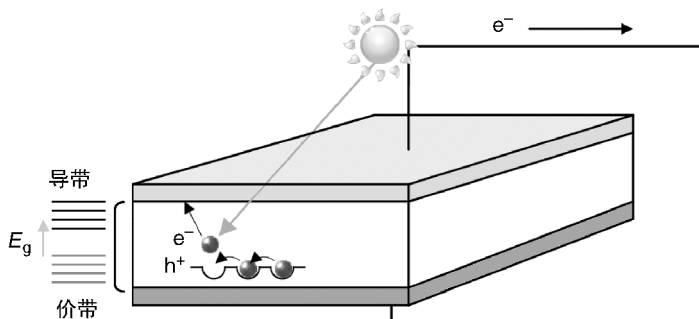


图 1.2 光伏电池的半导体层中光生载流子产生示意图

为了发电，电荷必须在电池内分开，电子流过外部电路。电路周围的电流产生必要的电流驱动外部设备。能源转换效率同时也称为电池效率，是电池产生的电能与电池上入射光能量的比值。理想下到达光伏组件的所有光将被转换为电力，比例等于1。数学上说，入射光的功率 P_{in} 将相当于通过光伏电池产生的功率 P_{out} [见式 (1.1)]。然而这是永远不会发生的，因此，对效率计算的深入分析应该靠什么才能有助于性能优化？具体来说，能量是电流 J 和电压 V 的乘积。因此，电池的能量转换效率 η 与电流和电压成正比。所有光伏制造商试图通过使电压、电流或两者最大化来优化能量。

$$\eta = \frac{P_{out} = VJ}{P_{in}} \quad (1.1)$$

下面的讨论将强调由光伏制造商优化电池电流的方法。化学材料可以通过增加对载流子电荷有用的漂移和扩散来优化。漂移是单电子电荷 e 、载流子电荷浓度 n 、载流子迁移率 μ 和施加的梯度 E 的乘积。电荷扩散是玻尔兹曼常数 k ($= 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J} \times \text{K}^{-1}$)、温度 T 、载流子迁移率 μ 和载流子电荷浓度梯度 ∇n 的乘积 [见式 (1.2)]。增加载体电荷的浓度和迁移率是化学家试图优化电池电流的两个主要考虑因素^[7]。

$$J = J_{\text{drift}} + J_{\text{diffusion}} = en\mu E + kT\mu \nabla n \quad (1.2)$$

1.1.2 优化光伏电池的电学性能

有多种情况会降低电池的理想能量转换效率。一些最可能的情况包括入射光的可用波长的集中和确保电荷分离，允许电子流过外部电路。鉴于它们的复杂性，每种情况都会逐一解释。

不同的光伏技术对不同波长的光敏感。因此，重要的是光伏行业要完全了解太阳光的自然光谱并围绕大气环境条件设计电池（见图 1.3）。

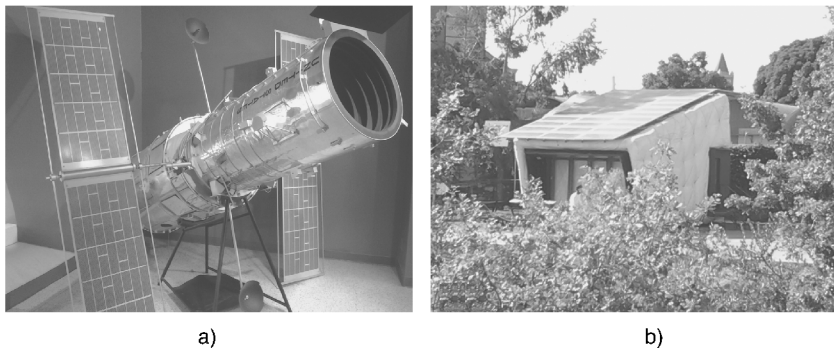


图 1.3 a) 光伏组件的太空使用示例（哈勃望远镜模型）；

b) 光伏组件的地面使用示例（组件在屋顶上）

幸运的是，太阳产生的光谱辐照度已经由航空航天界在卫星和航天飞机任务过程中测定了。而参考光谱已由美国测试和材料学会（ASTM）在 ASTM E490（标准太阳能常量和零空气质量太阳光谱辐照度表）中记录在案了^[8]。根据此标准，太阳的几乎 96.3% 辐射在 200 ~ 2500nm 波长之间，其余的 3.7% 发生在较长的波长。这种未过滤的电磁光谱通常称为空气质量零（AM0）（见图 1.4）。部署在太空应用中的太阳能电池通常会捕获红外区域的光谱发光。

太阳的电磁光谱被地球大气层中的各种分子过滤。氮气（约 78.08vol%）、氧气（约 20.95vol%）、氩气（约 0.93vol%）和二氧化碳（约 0.04vol%）是 4 种最多的化合物。水的数量也是以地理位置而变化。这些分子在各种波长下吸收。水、二氧化碳和氧气在近红外区域吸收。分子氧和氮在较短波长（<190nm）

下吸收。而臭氧（约 $7 \times 10^{-6} \text{ vol\%}$ ），身为地球上最普遍的大气过滤器，在弱紫外线（UV，200 ~ 300nm）区域被吸收。因此，太阳电池在地面安装必须在可见光区域（400 ~ 700nm）具有最大的转换效率，大部分的光在这个区域穿透。

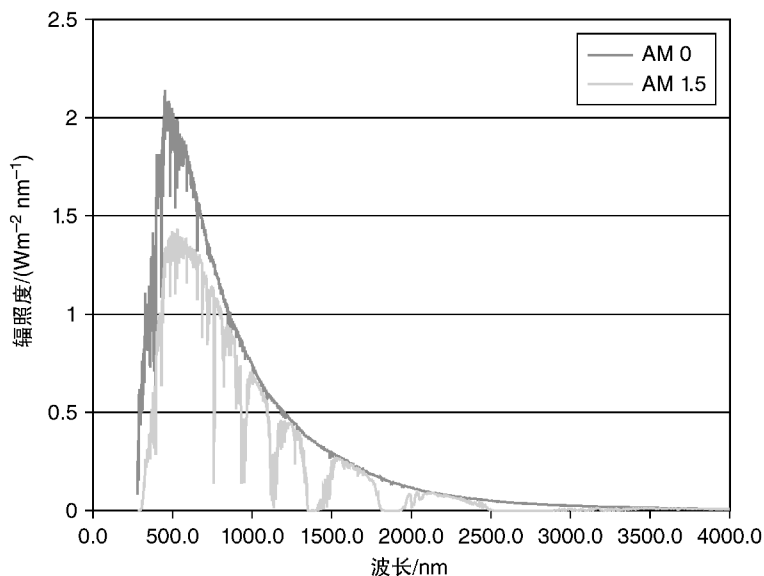


图 1.4 AM0 和 AM1.5 太阳光谱辐照度的比较曲线

光的强度也取决于地球和太阳之间的角度。这个角度取决于观察的时间，由季节和昼夜周期定义。它也是光伏组件位置的判断依据，由其在地球表面经度、纬度和高程定义。因为有大量的变量跟踪，所以科学家已经规范化了计算。惯例是使用空气质量，其定义为路线长度 L 到参考路径长度的比例。当太阳的位置与地球表面垂直时，光伏组件处于海平面 L_0 时的光路线，并评估参考路径长度 [见式 (1.3)]。这可以近似为 L 和 L_0 的角度 z 的反余弦。由于大多数光伏装置都大概在天顶角 48.2° ，中纬度海拔，因此导致空气质量为 1.5（AM1.5）（见图 1.5）。

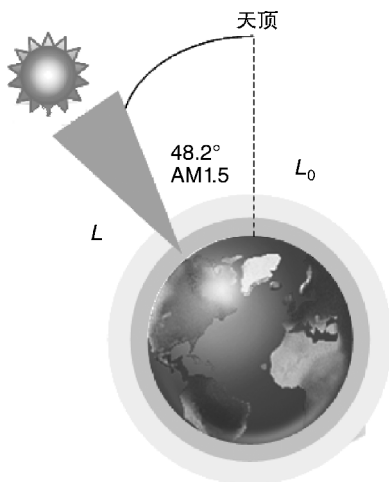


图 1.5 AM1.5 描述

$$AM = \frac{L}{L_0} \approx \frac{1}{\cos z} \quad (1.3)$$

即使在直接照射下，并非所有的入射光都可以收获，因为光伏电池只吸收特定波长的光。光可以被视为光子或量化能量的粒子。光谱可以表征为具有不同能量光子的分布。只有能量等于或大于电池禁带宽度的光子才会产生电输出（见表 1.1^[9]）。那些关键波长在 AM1.5 频谱中可以通过重新排列找到普朗克 - 爱因斯坦方程。可用光的最大波长与带隙的能量 E_g 成正比，与普朗克常数 h ($= 4.135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$) 和光速 c ($= 299\,792\,458 \text{ m/s}$) 的乘积成反比 [见式 (1.4)]。

$$\lambda = c \left(\frac{h}{E_g} \right) \quad (1.4)$$

表 1.1 半导体电池化学元素、禁带宽度和最大可用光谱波长

半导体化学元素	禁带宽度 E_g/eV	最大波长 λ/nm
单晶硅	1.1	1128
多晶硅	1.12	1107
非晶硅	1.7	730
CIS	1.04	1193
CIGS	1.2	1034
CdTe	1.5	827

来源：可再生能源研究国际科学小组和可再生能源发展，“全球光伏与风能报告”，2009 年 12 月。

当电池可用时，需确定一个狭窄可用的光区通过地球大气过滤的波长与被电池吸收的波长（见图 1.6）。举个例子，对于 CdTe 电池，波长比 827nm 波长长的光子不是与半导体化学相互作用，而是直接通过电池。而波长小于 827nm 的光子导致电力效率下降。这是因为波长很短，热能增加，产生的热量导致能量的转换效率下降。

最后，在产生电流之前电荷载流子的复合是造成效率低下的另一个突出原因。在它们复合之前经过的时间称为载流子寿命。如果载流子寿命为零，电子和空穴立即复合，没有电流。因此更长的载流子寿命增大了电池的电流和能量转换效率的浓度梯度。

因此，载流子电荷的空间分离是电池的至关重要的功能。这种分离可以通过形成二极管来实现电荷在空间上分离的梯度。用于光伏电池的最普遍的二极管是 pn 和 pin 结二极管（见图 1.7）。通过掺杂半导体形成 pn 结并结合杂质形成富电子 n 型层和富空穴 p 型层。两层通过 pn 结连接用电极封闭在相对的两侧。电子流出 n 型层通过外部电路进入 p 型层。通过具有本征层分离 p 型和 n 型层形成 pin 结。在本征层，半导体既不缺乏电子，也不缺乏空穴。高效的空间 p 型和 n 型层中的电荷分离允许有效的电荷流动，从而增加电池的电流。pn 结的类型是