

第 3 章 太阳能光伏

本章纲要

- 3-1 PN 结
- 3-2 光伏电池结构和工作原理
- 3-3 光伏技术种类
- 3-4 多结薄膜
- 3-5 光伏电池特性与参数
- 3-6 太阳能组件与阵列
- 3-7 太阳能组件数据表参数
- 3-8 聚光式光伏

本章内容

- 介绍原子以及硅的晶体结构。
- 描述半导体掺杂过程。
- 描述 PN 结及其工作原理。
- 描述光伏(PV)电池结构及其工作原理。
- 定义并描述光伏电池。
- 计算光伏电池的转换效率。
- 讨论如何将太阳能电池组装为组件和阵列,并计算对特定负载的输出电流、电压和功率。
- 介绍五到六种太阳能组件数据表的重要参数。
- 介绍光伏电池中使用的各种半导体材料。
- 介绍多结太阳能电池和激光划片。
- 介绍聚光式光伏系统。

关键名词

关键名词的定义可在各章结尾找到。

- | | |
|--------------------------------|---|
| • PN 结(PN junction) | • 多结(multijunction) |
| • 价电子(valence electrons) | • 效率(efficiency) |
| • 掺杂(doping) | • 填充因子(fill factor,FF) |
| • 自由电子(free electron) | • 太阳能组件(solar module) |
| • 空穴(hole) | • 太阳能阵列(solar array) |
| • 光伏电池(photovoltaic cell) | • 聚光式光伏(concentrating photovoltaic, CPV) |
| • 光子(photon) | • 高聚光型光伏(high-concentration photovoltaic, HCPV) |
| • 带隙能(band gap) | |
| • 结晶度(crystallinity) | |
| • 薄膜光伏(thin-film photovoltaic) | |

引言

本章将介绍硅的原子结构以及如何将硅及其他材料用于光伏(PV)电池的制造,将太阳能转化为电能。“光伏电池”和“太阳能电池”指的是同一装置,这两个名词通常可以互换使用。光伏电池是所有太阳能发电系统的基本组成部分,其材质、形状和大小各不相同。将多个光伏电池按一定方式排列并连接起来就形成了太阳能组件。将组件连接起来即可形成太阳能阵列。太阳能阵列的大小可从居民住宅用的小型阵列到用于并网发电的面积可达数公顷的大型太阳能系统。

目前世界上正在使用的可再生太阳能发电系统有以下几个类型:使用晶圆形光伏电池的平板阵列,使用薄膜光伏电池的可制成各种表面形状的太阳能阵列,使用透镜或反射镜将太阳光汇聚到光伏电池的聚光式光伏系统。每种系统都各有优缺点。

3-1 PN 结

1940年 Russel Ohl 在研究将硅作为雷达探测器材料的过程中偶然发现某些材料具有光敏性。他使用的硅板有一条狭缝,将硅板分为 P 型区和 N 型区。Ohl 发现当将硅板暴露于亮光下时,电流显著升高。原始光伏装置由此诞生。

硅(silicon, Si)是制造光伏电池最常用的材料。第 2 章已经提到,将杂质掺入纯硅或其他半导体材料中可改变其导电特性,并根据掺杂材料的不同而形成 P 型或 N 型半导体。如果一整块硅中部分掺杂入 N 型杂质,部分掺杂入 P 型杂质,则两种材料的边界称为 **PN 结(PN junction)**。太阳能电池和其他很多半导体器件的运行中 PN 结至关重要。

硅原子及其晶体结构

硅是地球上储量最丰富的元素之一,在沙子、石英和其他自然资源中都可找到硅的踪迹。硅可形成晶体结构,称为晶硅(c-Si),也可形成原子随机排列的无定形结构,称为非晶硅(a-Si)。两种硅在太阳能电池的制造过程中都非常有用。

晶硅中的硅原子之间由共价键连接并呈一定规则整齐排列。根据波尔模型(Bohr model),原子由原子核以及以不同半径围绕原子核旋转的电子层组成,原子核由质子和中子组成。中性硅原子含有 14 个质子,14 到 16 个中子,以及 14 个电子。如图 3-1(a)的硅原子模型所示,原子的外层电子称为**价电子(valence electrons)**。半导体或绝缘体的外电子层称为价带,价带的存在使电子束缚于原子周围。价电子与其他原子之间形成共价键。硅晶体中,每个硅原子与其相邻的四个硅原子各共享一个电子,形成如图 3-1(b)所示的四个共价键。晶体中每个原子都与相邻原子键合在一起。图 3-1(c)为硅晶体结构的示意图,晶体内所有原子都由共价键结合在一起。

硅晶体的掺杂

如前所述,纯净晶体硅的导电性极差。**掺杂(doping)**过程以精确可控的方式增加其电导率。可在硅中加入极低浓度的杂质原子,以产生多余的自由电子(N 型杂质)。由于缺少价电子而产生的缺陷称为空穴。五价杂质原子含有五个价电子,当掺杂入硅晶体时,其四个价电子可以与相邻的四个硅原子形成共价键,剩余的一个电子成为如图 3-2(a)所示的不受束缚的**自由电子(free electron)**。五价原子的代表有磷(P)、砷(As)、锑(Sb)和铋(Bi)。

三价杂质原子含有三个价电子,当掺杂入硅晶体时,三个价电子与相邻的四个硅原子形成共价键,如图 3-2(b)所示,其中一个共价键由于缺少电子而形成**空穴(hole)**。三价原子的代表有硼(B)、镓(Ga)和铟(In)。

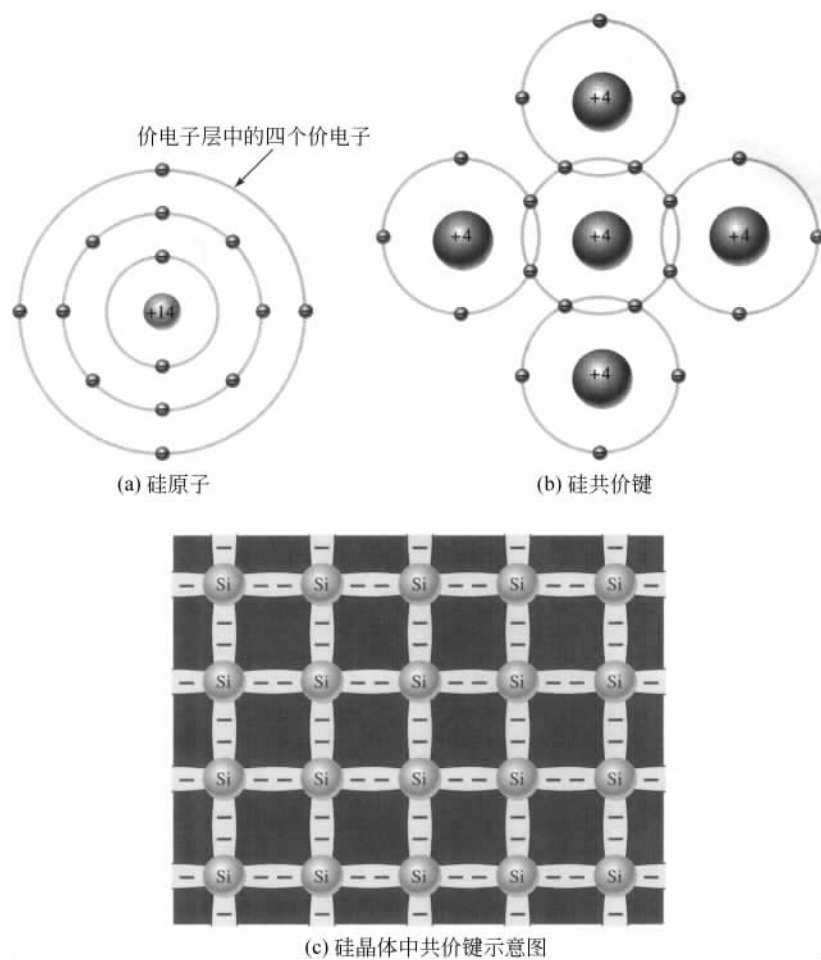


图 3-1 硅原子及其晶体结构

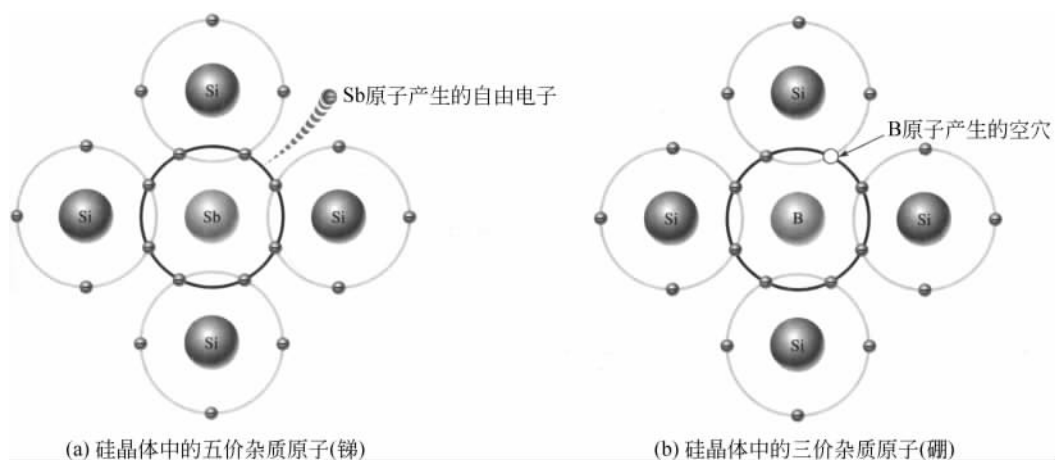


图 3-2 硅晶体的掺杂

PN 结的形成

图 3-3(a)所示为当一块硅晶体上层掺杂磷,下层掺杂硼之后,在 N 型区和 P 型区之间形成 PN 结的过程。N 型区的自由电子可向各个方向随机漂移。PN 结形成时,PN 结附近 N 型区中的自由电子通过扩散进入 P 型区,与 PN 结附近的空穴结合。

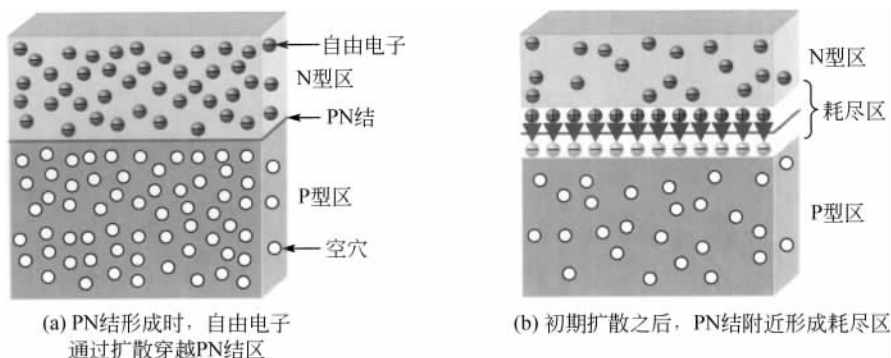


图 3-3 PN 结和耗尽区

在 PN 结形成之前,N 型材料中电子和质子的数量相同,使材料整体呈电中性。P 型材料也同样呈电中性。当 PN 结形成之后,N 型材料中的电子穿过 PN 结向 P 型区扩散,在 PN 结上方形成一层正电荷(五价离子)。当电子越过 PN 结之后,P 型区由于电子-空穴对的结合而失去空穴,导致 PN 结下方负电荷层(三价离子)的形成。这两层正负电荷层组成了如图 3-3(b)所示的耗尽区。耗尽区中电荷载子(电子和空穴)耗尽,因此得名。

耗尽区的形成

与 P 型区和 N 型区相比,耗尽区的厚度相当小。初期电子扩散越过 PN 结之后,在 PN 结附近形成耗尽区使两侧达到平衡状态,电子无法继续扩散穿过 PN 结。之所以能达到这一效果,是由于当电子越过 PN 结时,PN 结两侧分别积聚越来越多的正负电荷,当耗尽区的负电荷多到可以排斥所有扩散进入 P 型区的电子时,扩散自动停止。

在 PN 结两侧积聚大量正负电荷后,正负电荷之间形成如图 3-3(b)中箭头所示的电场。该电场阻止电子向 P 型区的扩散,只有在外界驱动力的作用下电子才有可能越过耗尽区。在二极管和晶体管中,该驱动力来自于电源;在太阳能电池中,该驱动力来自于入射光照。

3-1 节习题

1. 描述原子的波尔模型。
2. 硅中 N 型区是如何形成的?
3. 硅中 P 型区是如何形成的?
4. 什么是 PN 结?
5. 在无外加电压的情况下,是什么使电子无法穿越耗尽区?

3-2 光伏电池结构和工作原理

PN 结是常规光伏(太阳能)电池的关键特征。关于 PN 结的内容已经在 3-1 节讨论了。在 PN 结

太阳能电池中,太阳光为 N 型区中的自由电子提供足够的能量,使它们可以穿越耗尽区并与 P 型区的空穴结合。这一过程将在电池两端产生电势差(电压)。当连接外部负载时,电子可在负载中产生电流。

光伏电池结构

太阳能电池的类型有很多,太阳能电池技术也在不断进步,晶硅光伏电池仍是当前最广泛应用的技术。**硅光伏电池(photovoltaic cell, PV cell)**可通过光伏效应,利用掺杂形成 PN 结的硅片将太阳能直接转化为电能。杂质原子的掺杂深度和分布可在掺杂过程中精确控制。如图 3-4 所示,首先从高纯硅片上切割下薄圆硅片。对应具体的组件,将圆形硅片进一步切割为八边形、六边形或正方形。常用的硅锭生产工艺称为切克劳斯基法(Czochralski method)。切克劳斯基法首先将硅籽晶浸入熔融的硅中,将籽晶缓慢旋转并提起即可形成圆柱形硅锭。



图 3-4 硅片的生产

对硅片进行掺杂可产生 PN 结结构。为保证光透射度,N 型区的厚度比 P 型区小得多。如图 3-5(a)所示,通过光刻或丝网印刷可将很薄的导电接触栅预先沉积在硅片顶部。为了保证电池可收集尽可能多的阳光,接触栅线的面积必须尽可能小。接触栅线的合理布局可保证当连接负载时电子穿越硅片所经过的距离尽可能短。电子在材料中的行程越长,由材料中固有阻力导致的能量损耗越大。之后在硅片底部安装导电接触片,其示意图如图 3-5(a)所示。

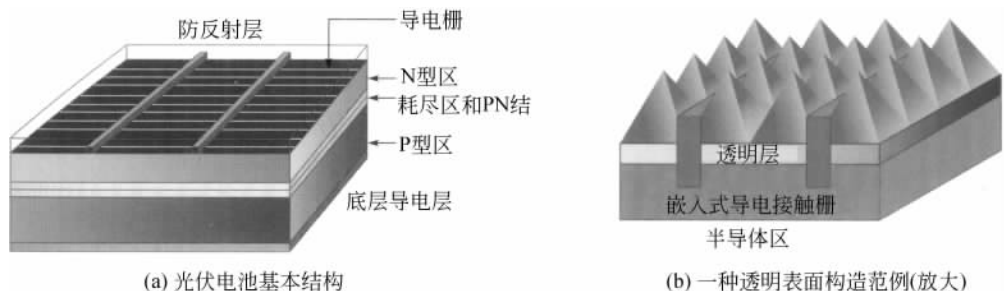


图 3-5 光伏电池基本结构以及透明表面构造范例

完成导电触片的安装后,硅片顶部将镀上一层防反射层。该镀层的目的是防止光伏电池表面对阳光的反射,让电池吸收尽可能多的太阳能。图 3-5(a)中光伏电池厚度与表面积的比率为了演示而大大夸大了。在某些光伏电池中,接触栅线嵌入如图 3-5(b)所示的由微小金字塔型凸起构成的表面结构中,该结构可以有效改善透光性。完整的光伏电池及其标准表面接触栅如图 3-6 所示。

光伏电池工作原理

光由光子(photon)组成。太阳每秒钟可输出惊人的能量,尽管到达

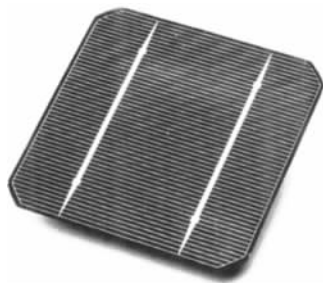


图 3-6 完整的光伏电池
(来源:国家可再生能源实验室)

地球的只是太阳总能量的一小部分,但是如果能充分利用的话,这部分能量已是人类所有能量需求的数倍。每小时到达地球的能量足以满足整个世界一年的消耗。

光伏电池的 N 型区非常薄,阳光可以穿透 N 型区到达 P 型区。整个太阳能电池的厚度大约与鸡蛋壳的厚度差不多。当光子穿透至 N 型区或 P 型区,与 PN 结附近的硅原子发生作用并使电子脱离价带成为自由电子时,脱离的电子在价带中留下一个空穴。这对电子和空穴称为电子-空穴对。使价带中电子获得自由成为自由电子的能量称为带隙能(band gap)。硅原子的带隙能为 1.12eV(电子伏特)。电子伏特是原子级尤其是电子常用的能量单位。在 P 型区,自由电子在电场作用下扫入 N 型区,在 N 型区积累形成负电荷。在 N 型区,空穴在电场作用下扫入 P 型区,在 P 型区积累形成正电荷。由此在 N 型区和 P 型区之间形成电势差。

当将光伏电池与负载连接时,自由电子通过 N 型区抵达上表面的接触栅线,并通过负载回到下表面,最终回到 P 型区与空穴复合。如图 3-7 所示,太阳光能量的输入可持续产生电子-空穴对。

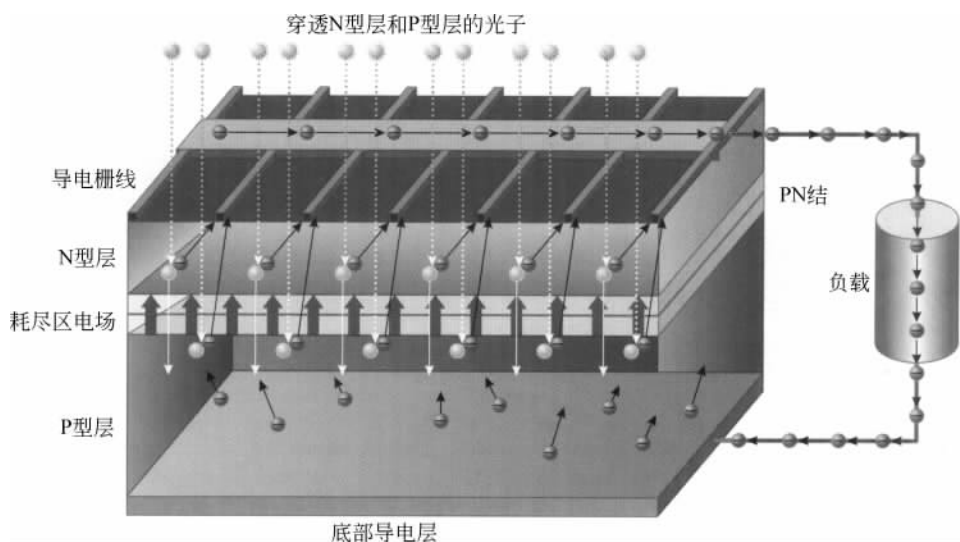


图 3-7 光伏电池在入射阳光下的基本工作原理

3-2 节习题

1. 说出晶硅光伏电池各部分的名称。
2. 为什么上表面的接触制成栅线的形式?
3. 如果能量足够大的光子抵达 P 型区会发生什么?
4. 什么是带隙能?
5. 什么是电子-空穴对?

3-3 光伏技术种类

前面集中讨论了晶圆形晶硅光伏电池,这是目前使用最广泛的光伏电池。目前三种主流的光伏材料为两种晶体半导体和非晶硅薄膜,这三种材料占据了光伏材料市场的大部分份额。另外两种不依赖于PN结的光伏电池为染料敏化光伏电池和有机光伏电池。光伏技术正经历着快速发展,效率和成本方面的改进正在不断涌现。

光伏材料的基本类型

光伏电池由各种半导体材料制成,其性能和成本各不相同。常规光伏电池的材料主要有三大类:单晶半导体、多晶半导体和无定形薄膜硅半导体。

单晶半导体

材料的**结晶度(crystallinity)**指的是某种材料原子在晶体结构中排列的完美程度。晶体中原子以有序重复的形式排列。单晶半导体的结构使电子可以高效地在材料中移动。

单晶硅是单晶半导体的代表。单晶硅由于其转换效率高而成为晶圆形光伏电池中最常用的材料。单晶硅的缺点是它的成本是所有硅材料中最高的。一般情况下单晶硅电池的转换效率为14%~18%,偶尔也可达到19%~20%。单晶硅光伏电池的基本结构已经在3-2节讨论过。

另一种单晶半导体为砷化镓(GaAs)。砷化镓是一种化合物,它对光子的吸收性比硅更好,其效率一般更高。但它在光伏电池中的成本比硅更高,因此主要应用于对材料需求量较小的聚光式光伏系统。砷化镓电池的耐热性很好,因此也广泛应用于卫星和其他太空应用中。

多晶半导体

与单晶半导体相比,多晶半导体制成的太阳能电池的转换效率普遍偏低,但其制造成本也比较低。多晶材料由无数小晶体组成,原子在每块晶体之间并不是有序重复排列的。

多晶硅是多晶材料的典型代表。多晶硅电池的转换效率一般为13%~15%。多晶硅电池由于其造价比单晶硅低,因此其应用也较广泛。带状硅是多晶硅片的一个变种,由从熔融的硅中直接提取的薄膜制成。尽管带状硅的效率较低,但其生产不需要从硅锭切割成硅片,因此生产成本更低。

另一种多晶硅电池由碲化镉(CdTe)薄膜制成。碲化镉为化合物,其带隙能为1.44eV,这与太阳光谱中能量最高的部分正好吻合。碲化镉对光子的吸收率也较高。碲化镉的成本比硅低,但效率比非晶硅电池高。碲化镉光伏电池的基本结构如图3-8所示。硫化镉(CdS)层掺杂为N型材料,厚度较大的碲化镉层掺杂为P型材料并作为主要能量吸收层使用。在某些情况下,碲化镉层也可能无须掺杂,而是加入另一层P型材料,如碲化锌(ZnTe),以在碲化镉中产生电场,其方向从硫化镉层指向碲化锌层。这样操作的原因是P型碲化镉的阻抗较大,而本征碲化镉则无此缺点。

多晶半导体的另一个代表是铜铟镓硒(CuInGaSe_2 , CIGS)。这一化合物半导体常用于薄膜光伏电池。铜铟镓硒的效率通常比碲化镉高,而且其光子吸收率是所有半导体中最高的。铜铟镓硒单位面积可产生的电流也比其他薄膜技术要高。图3-9为铜铟镓硒电池的基本结构,基于这种基本结构的变种也很常见。

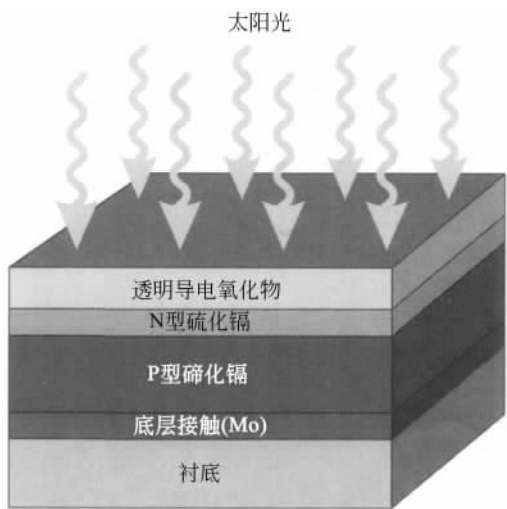


图 3-8 碲化镉薄膜光伏电池的基本结构

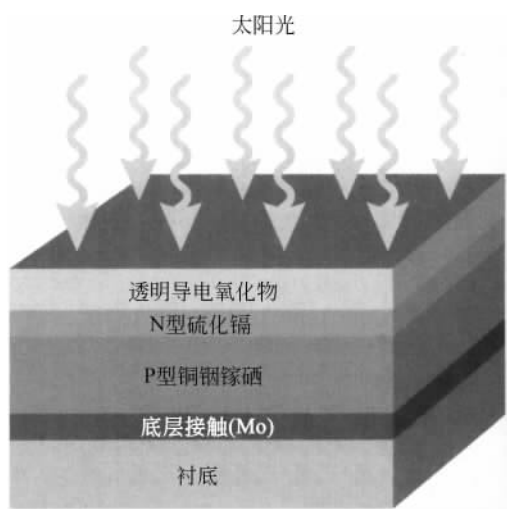


图 3-9 铜铟镓硒薄膜光伏电池的基本结构

非晶薄膜硅半导体

非晶薄膜硅半导体的硅是非晶体形态的,可比单晶硅吸收多至四倍的太阳辐射。薄膜光伏(thin-film photovoltaic)使用多层不到一微米至数微米厚的半导体材料。晶圆形硅电池的厚度为一百至数百微米。而薄膜形光伏电池所用的半导体层比晶圆形薄得多,因此其所需的材料只是晶圆形电池的几分之一,且制造流程简单,成本较低。

非晶硅(a-Si)的带隙能(1.75eV)比晶体硅(1.12eV)高,这意味着非晶硅对太阳光谱中可见光的吸收率比红外光(infrared)高。薄膜非晶硅电池中通常采用氢化非晶硅,也称为 a-Si:H。非晶硅常通过化学气相沉积法或其他手段沉积于塑料、玻璃或其他低成本固定或柔性基底上。非晶硅是硅光伏电池中成本最低的一种,它的转化效率也是最低的,通常在 5%~7%。纯净的非晶硅原子键中存在缺陷,限制了其在光伏发电中的效率。因此常采用掺氢的方式生成 a-Si:H,以改善其效率。

图 3-10 为氢化非晶硅(a-Si:H)薄膜光伏电池结构的剖面图。薄膜型器件通常不像晶圆形硅电池那样在顶部放置金属栅线作为电学接触。取而代之的是如氧化锡之类的透明导电氧化物(transparent conducting oxide,TCO)。这些氧化物具有良好的导电性,可用作电池的电极,同时又允许入射光通过。电池中通常采用 P-I-N 结构产生和运输电荷。P-I-N 结构中,P 型区和 N 型区之间放入一层本征层(I)。本征层(I 型 a-Si:H)将吸收大量入射光并产生大量电子-空穴对。N 型和 P 型层的厚度小得多,主要用来产生电场。在该电场作用下,自由电子向 N 型层移动,空穴向 P 型层移动。有些薄膜电池在底层作为电接触的钼(Mo)金属上再镀上一层透明导电氧化物作为反射层,将入射光反射回半导体层以提高吸收率。电池顶部通常再加一层玻璃作为保护层,同时也可起到防止反射的作用。

其他光伏材料类型

前面讨论的光伏材料均已应用于工业生产,这里介绍的其他两种光伏材料尚处于研发阶段,但已开始小规模的商业化应用。

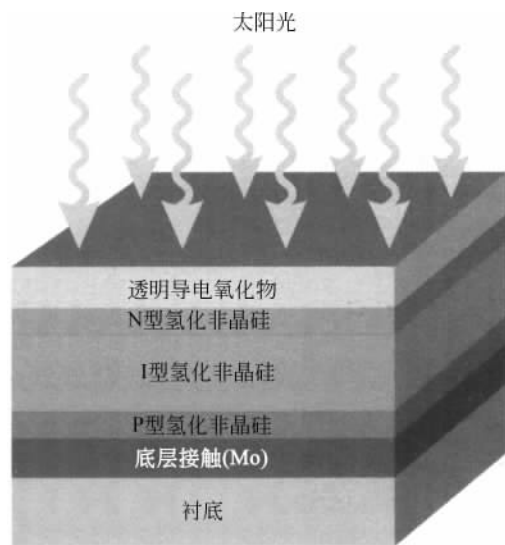


图 3-10 氢化非晶硅(a-Si:H)薄膜光伏电池的典型结构

染料敏化太阳能电池

Solaronix 染料电池

染料敏化电池的研究领域之一是如何将利用交替的光电阳极、电解液和阴极的染料电池制作于单一基底之上。瑞士 Solaronix 公司已经生产出了基于该原理的原型电池,目前正致力于解决如何将电解液置于薄层中而又避免干涸的技术。如果 Solaronix 公司能够获得成功,该技术将大大降低染料电池的生产成本。

(来源: David Buchla)

染料敏化太阳能电池(dye-sensitized solar cell, DSSC)是一种薄膜电池。植物的光合作用利用染料(叶绿素)吸收太阳光并将其存储为化学能。染料敏化电池的原理与之类似,但是可将太阳能直接转化为电能。最简单的染料敏化电池由光电阳极、阴极和液态电解质组成。光电阳极由已敏化并沉积于玻璃基底的二氧化钛(titanium dioxide, TiO_2)薄膜组成。当光子被敏化层吸收时,使二氧化钛半导体中的电子向更高能级跃迁并迅速注入导带(少量电子在二氧化钛内部复合,无法为负载提供能量)。电子流过外部负载之后回到由沉积于玻璃基底上的铂(Pt)金属构成的阴极。通过电池内液态电解质内部复杂的氧化还原反应,聚集于阴极的电子输送至染料层并最终保持电荷守恒。

染料电池在未来应用中具有巨大优势。首先,染料电池的制造无须硅电池生产过程中必需的昂贵的高温高真空工艺。二氧化钛作为绘画中的常用染料,具有储量丰富、廉价、无毒等特点。染料电池可在极低辐照度条件下工作,这一点对于北方或室内应用尤其重要。由于染料电池的制造成本相对较低,相应的投资回收期(收回电池制造成本所需的时间)随着技术的进步也会大大缩短。染料电池的缺点是其效率低于固体电池,且染料电池的工作需要液态电解质。目前研究的重点主要集中于阳极、染料、阴极以及电解液的改进,期望提高染料电池效率以及降低成本。

有机光伏电池

有机光伏电池(organic photovoltaic cell, OPV)是另一种类型的薄膜电池。最基本的有机光伏电池由夹于两电极之间的单层活化聚合物材料(染料)组成。有机电池的应用场合非常灵活,且成本极低,可大量生产,但其效率较低。研究人员目前正致力于研究采用不同材料、缓变结或不同生产工艺的方法以改进其效率。

染料敏化电池和有机光伏电池与前面提到的光伏技术的不同之处在于,它们都不使用 PN 结。

环境影响

太阳能光伏电池对环境几乎没有影响。它们对环境的负面影响仅限于太阳能发电装置对视觉美观、占地、野生植物和动物的影响,以及在光伏电池生产过程中化学物质泄漏可能对土壤和地下水造成影响。碲化镉电池和铜铟镓硒电池中使用的镉与汞类似,含有剧毒且可进入食物链。大多数生产含镉光伏电池的厂家都建立了回收机制,以便在含镉薄膜电池到达使用寿命后进行回收。美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)以及其他机构正在研发无镉太阳能光伏产品。

3-3 节习题

1. 硅光伏电池中使用的材料有哪三种?
 2. 什么是 TCO 层? TCO 层的用途是什么?
 3. 薄膜光伏电池与晶圆光伏电池相比的优势是什么?
 4. 染料敏化光伏电池中染料的作用是什么?
-

3-4 多结薄膜

开发多结光伏电池主要是出于提高效率的目的。从原理上来说,多结光伏电池将多个单结光伏电池串联以吸收更宽的太阳光谱,从而达到提高效率的目的。

多结(multijunction)薄膜光伏电池可由两个或多个单结电池按带隙能降序串联连接得到,其主要目的是增加入射太阳能的吸收从而提高转换效率。每个单结电池的带隙能可通过增加或调节掺杂半导体的量或半导体物质的种类进行调制。顶层电池的带隙能最高,可吸收高能光子转化为电能,同时允许剩余的低能光子通过并被底层的低带隙能电池吸收。图 3-11(a)所示为一块三层多结光伏电池的基本结构。

太阳辐射光谱由紫外线(UV)、可见光和红外线(IR)组成。辐射的种类由其波长和频率决定。波长反比于频率。红外线的波长比可见光长,紫外线的波长比可见光短。可见光的波长介于 400nm~700nm 之间,并随红、橙、黄、绿、蓝、紫的顺序波长依次递减,频率依次递增。光子所含的能量反比于波长,正比于频率。

明亮阳光(有时也称为峰值日照)在海平面的辐射通量密度约为 $1\text{kW}/\text{m}^2$,其中约 44%来自于可见光,53%来自于红外线,只有 3%来自于紫外线。显然,太阳的大部分能量位于红外谱区。多结太阳能电池可吸收包括可见光和红外线在内的更宽的光谱,与之相比,单结光伏电池则通常只能吸收部分可见光区的能量。图 3-11(b)为三层光伏电池的吸收曲线,从图中可以看出,该多结电池对整个太阳辐射光

谱具有较大的吸收谱宽度。

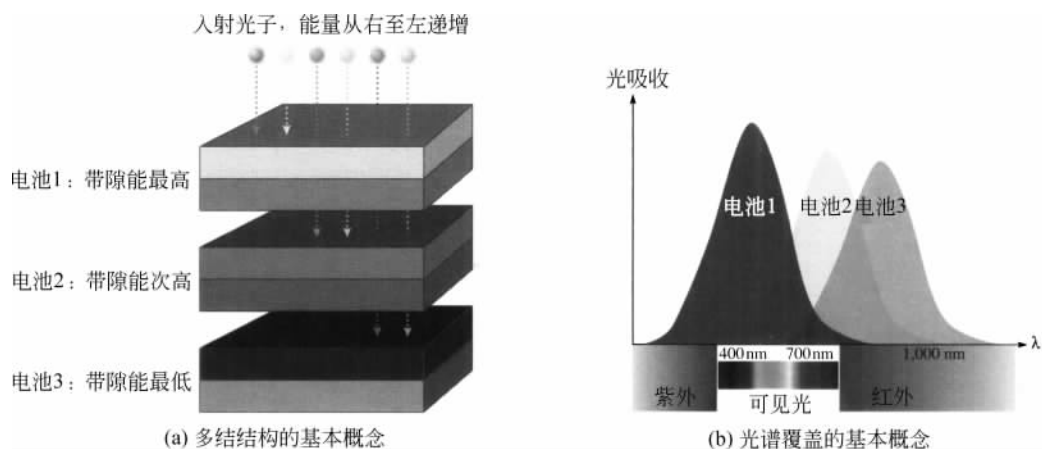


图 3-11 多结光伏电池的基本概念

图 3-12 所示为一块典型的非晶硅多结光伏电池。每层都具有 P-I-N 结构。入射光通过透明导电氧化物层(TCO)进入电池,并主要被本征非晶硅(a-Si)和非晶锗化硅(a-SiGe)吸收。掺杂非晶硅充当 N 型材料,掺杂微晶硅(microcrystalline silicon, $\mu\text{c-Si}$)充当 P 型材料。非晶硅中添加锗以调节材料的带隙能。微晶硅的导电性比非晶硅强。更重要的是,微晶硅对太阳光谱红色和红外部分的吸收率更高。

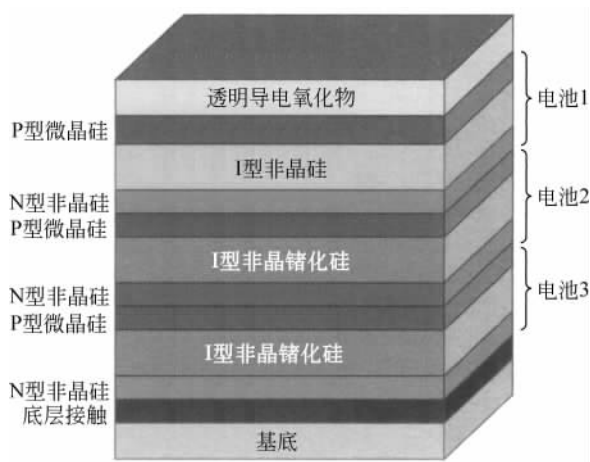


图 3-12 多结非晶硅光伏电池的基本结构

3-4 节习题

1. 研发多结光伏电池的目的是什么?
2. 可见光波长范围是多少?
3. 红外辐射的波长比可见光长还是短?
4. 红光还是紫光的能量更高?

3-5 光伏电池特性与参数

光伏电池特性指对电池性能的测量,以确定其转换效率及关键参数。转换效率表征的是入射光能量最终转化为电能的比率。最优工作点和光谱响应也是光伏电池的关键参数。最优工作点表征的是可产生最大输出功率的工作条件,光谱响应表征的是电池对不同频率入射光的响应。其他重要参数包括电流如何随输出电压和光照强度变化等。

电流-电压曲线

从光伏电池的电流-电压(I - V)曲线可以看出,在入射光强度恒定的情况下,电流在一定的输出电压范围内是恒定的。如图 3-13 所示的光伏电池的典型 I - V 特征曲线中,短路输出电流 I_{sc} 为 2A。由于输出端短接,输出电压为 0V。对于开路电路,输出电压 V_{oc} 为最大值(0.6V),但电流为 0A。

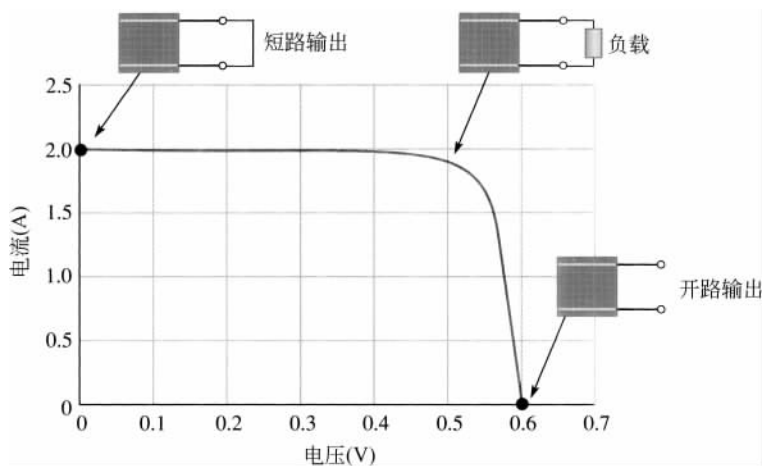


图 3-13 光伏电池的典型 I - V 特征曲线

输出功率

光伏电池的输出功率为电流乘以电压,因此短路($V_{OUT}=0$)和开路($I_{OUT}=0$)情况下输出功率均为 0W。在短路点和电流拐点之间,电流基本保持恒定,因此输出功率取决于电压。最大输出功率出现于电流拐点处,该点处的电压大约为 0.52V,称为最大功率点(Maximum Power Point, MPP)。最大功率点之后电流急剧下降,输出功率也迅速减小。图 3-14 中,曲线①代表输出功率,其最大值 $P_{OUT(MAX)} = V_{MPP} I_{MPP} = (0.52V)(1.85A) = 0.96W$ 。要获得最大功率,电池负载必须为

$$R_L = V_{MPP} / I_{MPP} = 0.52V / 1.85A = 0.281\Omega$$

随辐照度变化的 I - V 特征

光伏电池输出电压受光照强度(辐照度)变化影响不大,但是电流随辐照度的下降而下降,因此功率也随辐照度的下降而下降。光伏电池参数通常在标准测试条件(Standard Test Conditions, STC)下标

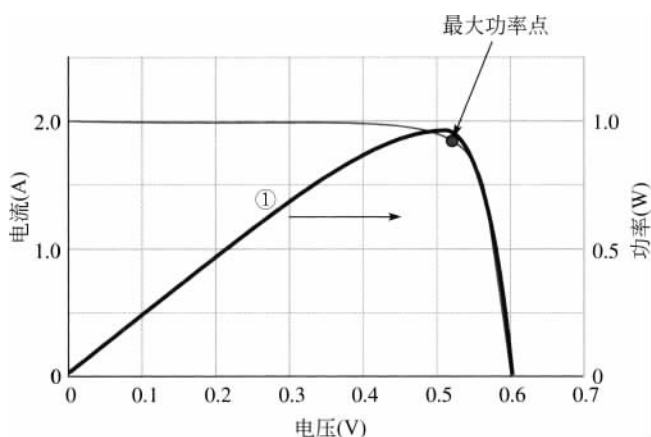
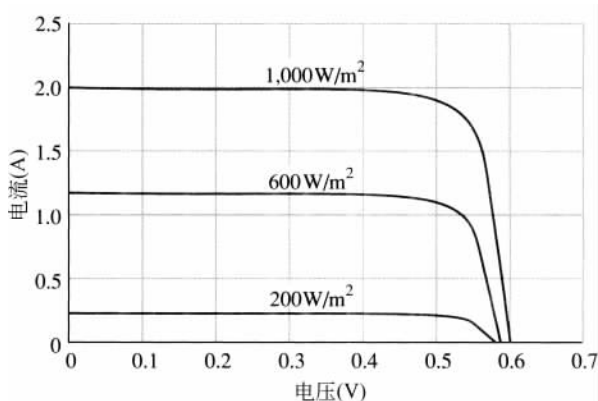


图 3-14 光伏电池的典型功率曲线

定,即在辐照度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$,温度为 25°C ,大气质量(Air Mass, AM)参数为 1.5 的条件下进行测试。大气质量表征大气对地球表面接收太阳光的影响程度。太阳光直接垂直照射到地球表面的情况下大气质量为 1。图 3-15 所示为三种辐照度值下的典型 I - V 曲线。给定辐照度下电池的输出电流各不相同。

图 3-15 随辐照度变化的 I - V 特征曲线

能量转换效率

光伏电池的**效率(efficiency)**是指入射至电池表面的能量与产出电能的比值,其公式可写为

$$efficiency = \left[\frac{P_{\text{OUT(MAX)}}}{E \times A} \right] \times 100\% \quad (3-1)$$

上式中: $P_{\text{OUT(MAX)}}$ 为电池的最大输出功率,单位为瓦(W); E 为电池表面的入射光辐照度,单位为瓦每平方米(W/m^2); A 为电池表面积,单位为平方米(m^2)。

光伏电池通常为正方形,边长一般为 $10 \sim 127\text{mm}$,或者更长。单晶硅光伏电池的效率通常为 $14\% \sim 18\%$ 。有些生产厂商标称其产品的效率可高于 18% 。

例题 3-1

某太阳能电池表面辐照度(E)为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 。如果电池的尺寸为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$,在最高功率点的电压为 0.5V ,电流为 3A ,请问该电池的转换效率是多少?

答案

$$\text{表面积: } A = (100\text{mm})(100\text{mm}) = 0.01\text{m}^2$$

电池表面的输入功率为

$$P_{\text{IN(SURFACE)}} = E \times A = (1000\text{W}/\text{m}^2)(0.01\text{m}^2) = 10\text{W}$$

电池的最大输出功率为

$$P_{\text{OUT(MAX)}} = V_{\text{MPP}} I_{\text{MPP}} = (0.5\text{V})(3\text{A}) = 1.5\text{W}$$

转换效率为

$$\text{efficiency} = \left[\frac{P_{\text{OUT(MAX)}}}{E \times A} \right] \times 100\% = 15\%$$

影响转换效率的因素

影响光伏电池转换效率的因素有: 电池的类型、电池上表面的反射系数、热力学系数极限、量子效率、最大功率点以及内部电阻。当光子到达电池表面时,部分被反射,部分被吸收。防反射镀层可有效降低电池对光子的反射;某些不规则表面结构也可降低电池的反射率;入射光子的入射角也是决定反射率的因素之一。热力学效率与光子能量有关。能量低于硅带隙能(1.12eV)的光子无法产生电子-空穴对,因此它们的能量无法转化为电能,而只能转化为热能。能量等于或大于硅带隙能的光子可以产生电子-空穴对,并将能量转化为电能。如果光子能量大于硅带隙能,多余的能量传输给电子-空穴对并最终耗散。量子效率与短路情况下可提供电流的光子数有关。不是所有从电子-空穴对获得自由的电子均可提供电流,部分电子会丢失能量并与空穴复合。某些波长的吸收率更高,因此量子效率与光波长有关。最后,让光伏电池工作在最大功率点对转换效率至关重要。如前所述,最大功率点出现在 I - V 曲线的拐点处,其值与负载相关。在光伏发电系统中,通常采用最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)技术维持系统的最大功率输出。

在太阳能电池组件表面贴一块透明胶布,就可将其输出功率提高 10% 。透明胶布是一块带有微结构的聚合物薄膜,可改变入射阳光的光路,其结构导致面板可吸收更多阳光并产生更多电能。

填充因子

光伏电池的填充因子是评估电池性能的重要参数。**填充因子(fill factor, FF)**表征的是光伏电池实际最大输出功率($V_{\text{MPP}} \times I_{\text{MPP}}$)与理论最大输出功率($V_{\text{OC}} \times I_{\text{SC}}$)的比值:

$$\text{FF} = \frac{(V_{\text{MPP}}) \times (I_{\text{MPP}})}{(V_{\text{OC}}) \times (I_{\text{SC}})} \quad (3-2)$$

上式中: FF 为填充因子(无单位); V_{MPP} 为最高功率点处电压,单位为伏特(V); I_{MPP} 为最高功率点处电流,单位为安培(A); V_{OC} 为开路电压,单位为伏特(V); I_{SC} 为短路电流,单位为安培(A)。

典型商用光伏电池的填充因子一般大于 0.7 。商用太阳能电池组件制造过程中,必须测试每块电

池的填充因子。如果填充因子过低(小于 0.7),则该电池将标为低等品。图 3-16 为填充因子的示意图。

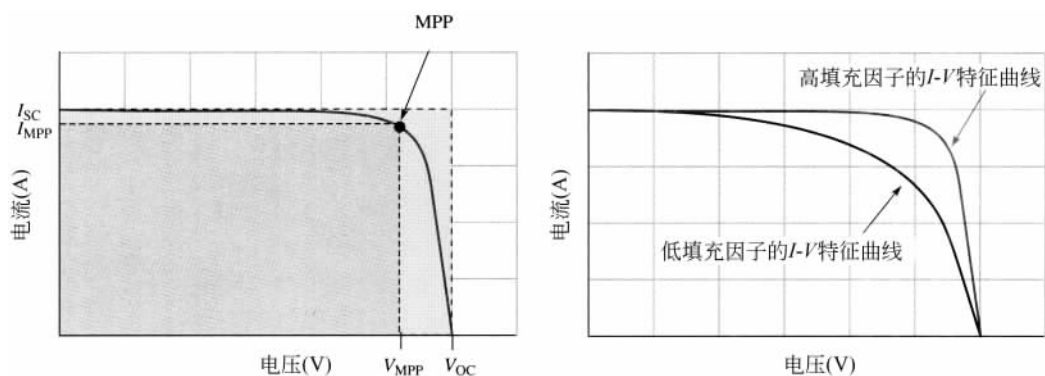


图 3-16 光伏电池的填充因子

温度对光伏电池的影响

温度对光伏电池的输出电压和电流存在影响。图 3-17 所示为在恒定辐照度下,开路输出电压随温度的升高而降低(由于带隙能的改变),但电流受温度影响较小。从图中可以看出,光伏电池在温度较低情况下性能更好。

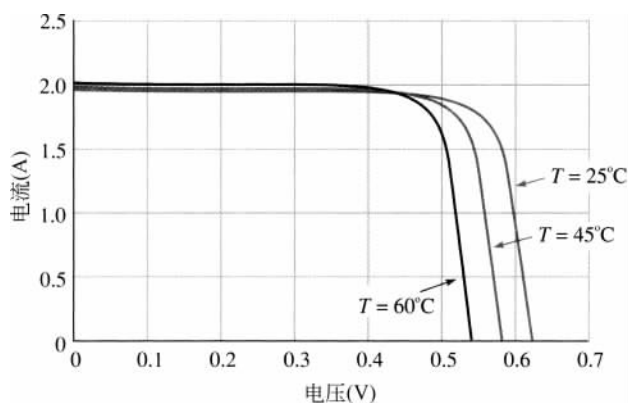


图 3-17 恒定辐照度下温度对光伏电池输出电压和电流的影响

3-5 节习题

1. 光伏电池电流为 I_{sc} 时,电压是多少?
2. 最大输出功率点出现在 $I-V$ 曲线的何处?
3. 要使光子在光伏电池中有效产生电子-空穴对,其最低能量是多少?
4. 影响光伏电池转换效率的因素有哪些?
5. 当温度降低时,光伏电池的性能变好还是变差?
6. 什么是填充因子?

3-6 太阳能组件与阵列

单个光伏电池在最大功率点的输出电压仅为 0.5V 左右,这对大多数应用都是无法接受的。因此,一般将多个光伏电池连接起来形成太阳能组件;一个或多个组件(有时称为面板)连接形成太阳能阵列。组件可制成标准尺寸,通常非常坚固。大型面板一般在单位成本下可提供更高的功率。典型的大型组件在正午或晴朗天气下可提供 250W 功率。

如图 3-18(a)所示,为获得更高输出电压,通常将多块光伏电池串联连接。例如,六块电池串联理想情况下可提供 $3\text{V}(6 \times 0.5\text{V})$ 的电压。由于它们是串联连接,每块电池中的电流相等。为提高载流量,可将多个串联的电池组如图 3-18(b)并联连接。假设一块电池在最大功率点可提供 2A 电流,十二块电池先串联再并联之后可提供 4A 的电流、 3V 的电压。两条支路可各提供 2A 电流,并在 P 点合并,共为负载提供 4A 的电流。

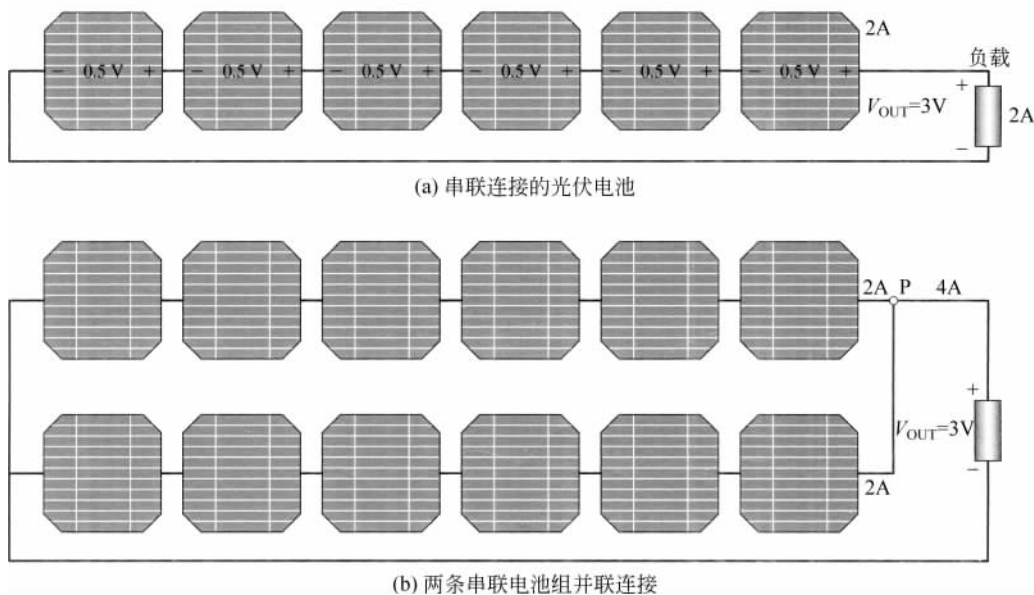


图 3-18 串联和并联连接的光伏电池

例题 3-2

现有 6 组光伏电池并联连接,每组由 12 块光伏电池串联而成。假设每块光伏电池在最大功率点的输出电流为 1.5A ,输出电压为 0.5V 。请计算最大功率点条件下的输出电流、电压和功率。

答案

每组串联电池组的输出电流和电压为

$$V = (12)(0.5\text{V}) = 6\text{V}$$

$$I = 1.5\text{A}$$

总输出电压、电流和功率为

$$V_{\text{OUT}} = 6\text{V}$$

$$I_{\text{OUT}} = (6)(1.5\text{V}) = 9\text{A}$$

$$P_{\text{OUT}} = V_{\text{OUT}} I_{\text{OUT}} = (6\text{V})(9\text{A}) = 54\text{W}$$

太阳能组件

太阳能组件(solar module)为多个光伏电池的組合,以提供特定的功率、电压和电流为目的。标准组件通常由 36、72 或 96 个预制的光伏电池组成,但也可由其他数量的电池组成。太阳能模板的前面板通常由钢化玻璃或其他透明材料制成,后面板由防水材料制成。组件四周作防水封装处理,并由铝框或其他金属材料作为支撑。组件的背面通常带有接线盒以连接电气。图 3-19(a)所示为一典型太阳能组件,图 3-19(b)为部分组件的剖面图,显示其基本结构。每块电池上方都有导电条可与前块电池底部的导电条相连形成串联电路。

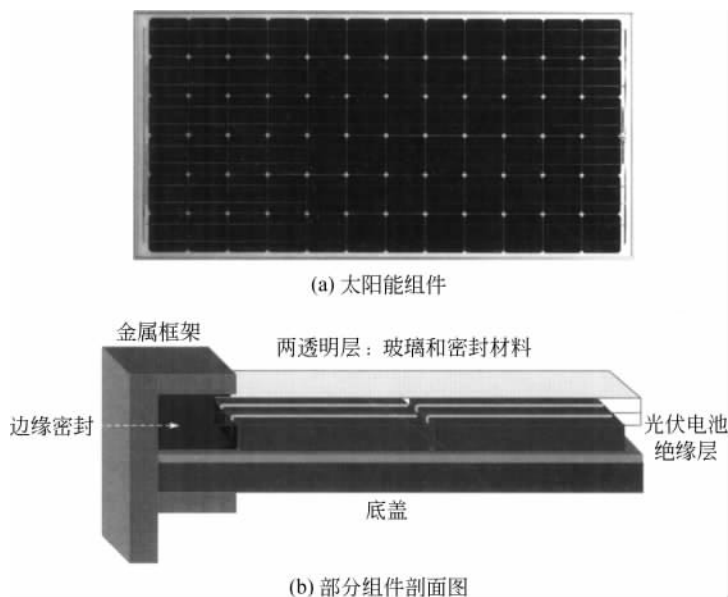


图 3-19 典型的 72 电池太阳能组件及其剖面图

(来源:国家可再生能源实验室)

大部分组件内的光伏电池均采用串联连接,以提供太阳能发电系统常用的特定电压值;有些组件也可能采用串联与并联混合的方式。例如,一个 36 电池的串联组件理论上可产生的电压为 18V,一个 72 电池的串联组件理论上可产生的电压为 36V,两个组件所能提供的最大输出电流与单一电池的输出电流大致相等。如果 72 电池组件在最大功率点的输出电流为 4A,则额定最大输出功率为

$$P_{\text{OUT}} = V_{\text{MPP}} I_{\text{MPP}} = (36\text{V}) \times (4\text{A}) = 144\text{W}$$

光伏组件的性能通常由前文提到的标准测试条件下测得的最大直流输出功率决定。标准测试条件要求在大气质量参数为 1.5 的条件下进行测试。大气质量表征大气对地球表面接收太阳光的影响程度。当阳光穿透大气层时会因受到大气的散射和吸收而减弱。光线在大气中通过的距离越长,衰减也越强。前文已提到大气质量参数代表相对空气质量。海平面天顶的大气质量参数为 1。同时标准测试条件要求光源必须满足特定的光谱分布要求。由于这些条件并非总是与光伏组件或阵列的实际工作条

件吻合,因此其实际输出一般低于其额定功率。

薄膜光伏电池可在大面积硬质基底上生产并制成平板组件,也可在大面积柔性基底上生产并铺于如图 3-20 所示的曲面上。



图 3-20 典型薄膜光伏组件结构

DSSC 组件

目前科研人员已经开发出一种生产小型染料敏化光伏电池 (dye-sensitized solar cell, DSSC) 组件的工艺。该工艺采用丝网印刷技术,生产出的组件转换效率约为 6%~7%。典型的 DSSC 组件如图 3-21 所示。

染料敏化电池的应用之一是装饰性建筑幕墙。根据使用不同种类的染料,可改变电池的颜色,使之与建筑浑然一体。

薄膜组件的划片

如前所述,现有工艺可生产大面积薄膜光伏电池。大面积电池的输出电压与小电池的输出电压是一样的,因此在实际应用中,大块的光伏电池必须切割为小块电池并通过串联或并联连接获得所需要的电压。划片 (scribing) 技术是利用激光束在面板上进行精确切割。划线 (scribe lines) 通常只有数十微米宽。通过激光束类型和聚焦点的选择可对不同层进行切割。划片可实现双重目标: ① 将大块电池切割成小块; ② 可将小块电池串联连接。图 3-22 为划片的基本过程,将薄膜光伏电池板切割为多电池组件。



图 3-21 染料敏化太阳能组件
(来源: 国家可再生能源实验室)

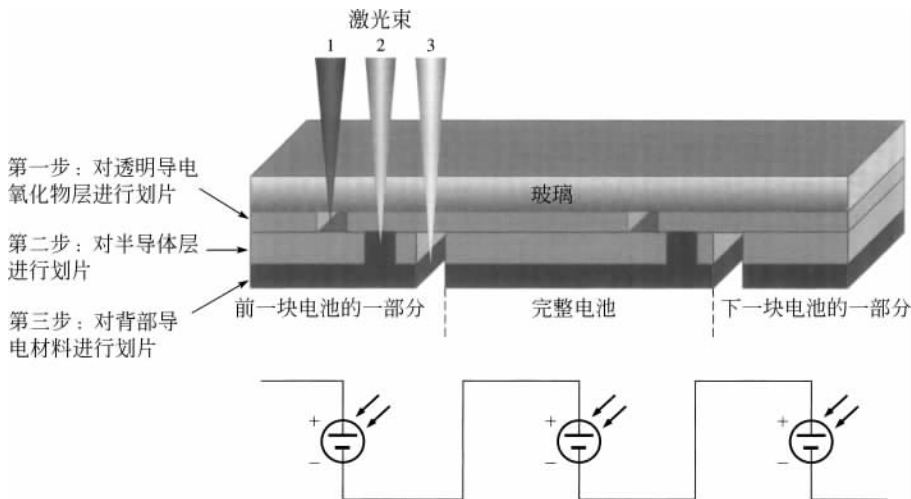


图 3-22 切片的基本过程

光伏电池阵列

光伏电池阵列(solar array)由多个组件组成。为提高额定输出功率同时保持输出电压不变,通常将两块或多块组件并联形成阵列。图 3-23 所示为一个三组件阵列,它由三块 72 电池组件并联连接而成。为与其他面板连接方便,输出端口都使用标准接口。

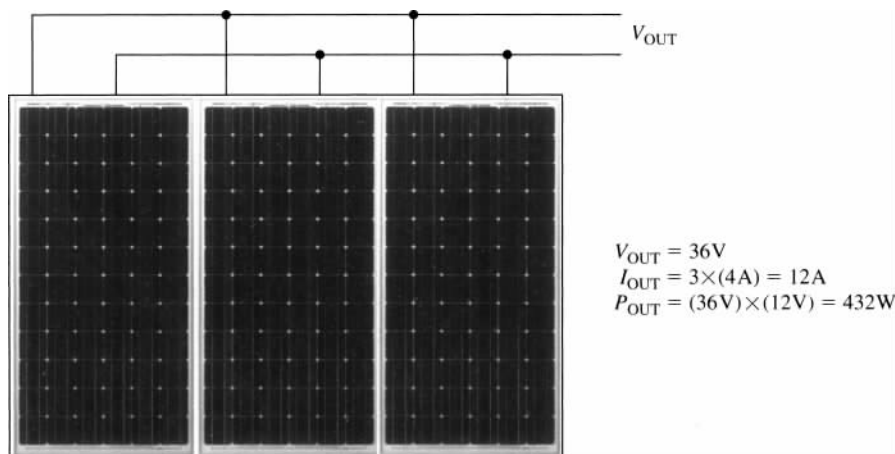


图 3-23 三组件光伏电池阵列

(来源:国家可再生能源实验室)

例题 3-3

某应用需要 36V 电压,以及至少 1kW 的最大额定输出功率。请计算如何使用 36 电池组件实现上述要求,每块组件的输出电压为 18V,输出电流为 5A。

答案

要获得 36V 的输出电压,必须将 2 块 18V 电池组件串联连接。两块串联组件的输出功率为

$$P_{\text{OUT}} = (36\text{V}) \times (5\text{A}) = 180\text{W}$$

为达到至少 1kW 的输出功率,需要的并联组件数为

$$\frac{1\text{kW}}{180\text{W}} = 5.56$$

组件数不能为小数,因此需要 6 对串联组件并联连接以产生至少 1kW 的输出功率。最终的太阳能面板由 12 块组件组成,最大输出功率为

$$P_{\text{OUT}} = 6 \times (36\text{V}) \times (5\text{A}) = 1080\text{W}$$

必须要注意的是,太阳能发电设施的额定输出功率都是在标准测试条件下测得的。例如,例题 3-3 中的输出功率为 1080W,但是在有云或其他物体阻挡,或温度高于 25℃ 时,其输出功率要低于 1080W。此外,如果面板无法追踪太阳的运动,那么大多数时间里入射光与面板的夹角小于 90°,也会导致输出功率降低。并且,夜晚不会有功率输出。

光伏电池阵列有大有小。小型装置通常为家用,或为路灯、交通灯等提供电力的单一用途设施。大型阵列通常为工业用,或为小型社区或电网提供电力。图 3-24(a)为典型的安装于屋顶的家用光

伏阵列。图 3-24(b)为用于向科罗拉多州 Mesa Verde 国家公园游客中心提供电力的独立式太阳能阵列。

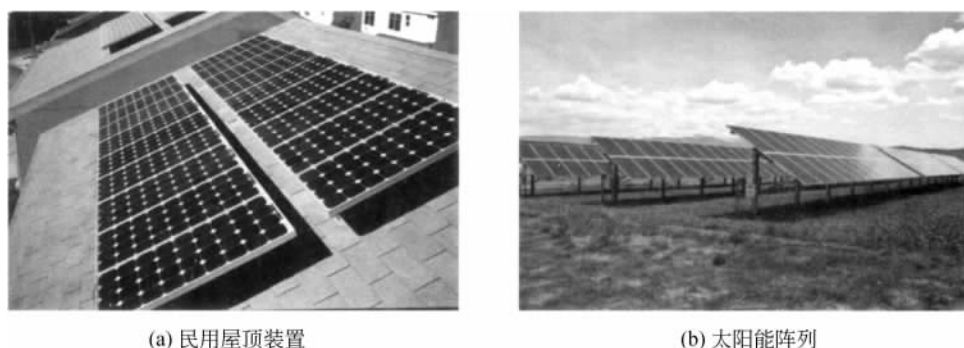


图 3-24 太阳能阵列

(来源: 图(a)由美国国家可再生能源实验室提供; 图(b)由 David Buchla 提供)

光伏太阳能农场

世界各地都建有为电网提供电力的大型光伏阵列。在日本,一座 70MW 的大型太阳能农场于 2013 年 11 月建成,以帮助解决 2011 年 3 月福山核电站事故带来的能源短缺问题。作为美国大型太阳能农场的代表,佛罗里达州 Power & Light 公司的 DeSoto 下一代太阳能中心(见图 3-25)建有超过 90000 块光伏组件的太阳能阵列,总额定功率为 25MW,每年可生产约 42000 兆瓦时(MWh)的电能,相当于平均 4.8MW 的持续输出功率。加州 Mojave Desert 和 Tehachapi Mountain 附近已规划为未来大型太阳能农场中心。



图 3-25 DeSoto 下一代太阳能中心

内华达州拉斯维加斯附近 Nellis 空军基地内的 Nellis 太阳能系统是美国大型太阳能农场的另一代表。该系统每年可生产超过 2500 万千瓦时(kWh)的电能,峰值输出功率大约为 13MW。

3-6 节习题

1. 将光伏电池串联连接可提高输出电流还是输出电压?
2. 三种标准太阳能组件内的电池数各为多少?
3. 什么是太阳能组件?
4. 什么是太阳能阵列?
5. 什么情况下会导致太阳能组件的输出功率小于其额定功率?

3-7 太阳能组件数据表参数

如前所述,太阳能组件最重要的参数包括短路电流、开路电压、输出电压和 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 辐照度下的额定功率,所有这些参数都是在标准测试条件下测量的。同时,太阳能组件也必须具备某些机械特性以抵抗风吹、雨淋及其他条件下的损坏。

典型的由晶圆形光伏电池组成的太阳能组件的数据表如图 3-26 所示。注意数据表分为以下几部分:电学数据、机械数据、 I - V 曲线、测试条件、质保和证书以及几何尺寸。尽管各个厂商数据表的格式不尽相同,但这些信息大部分都包含在内。图 3-26 中的数据表使用了名词“面板(panel)”,而非“组件(module)”,这些名词是可以互换使用的。图 3-27 所示为碲化镉薄膜组件数据表。

例题 3-4

参考图 3-26 中的数据表,计算该太阳能电池的填充因子。

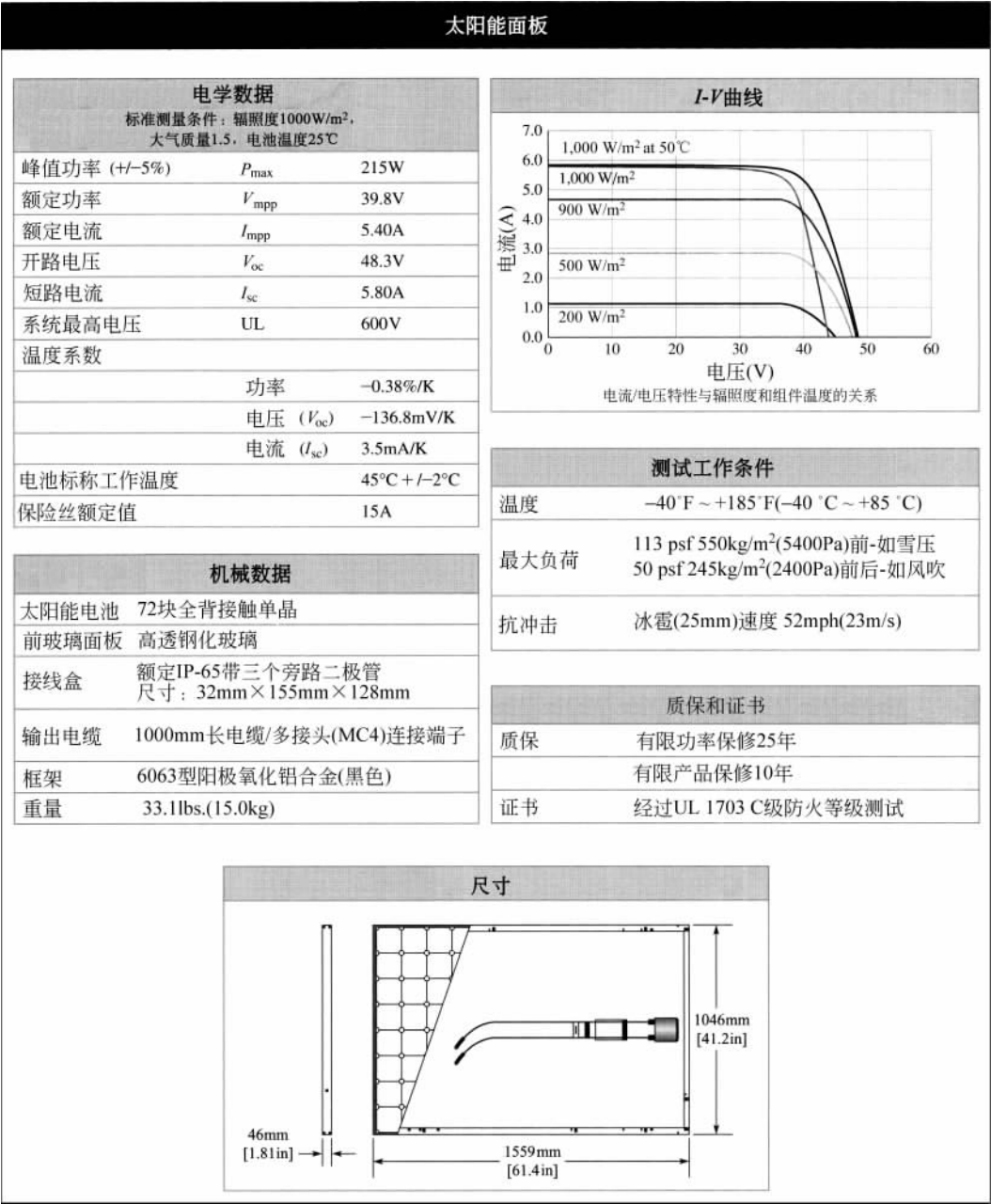
答案

$$V_{\text{MPP}} = 39.8\text{V}, \quad I_{\text{MPP}} = 5.40\text{A}, \quad V_{\text{OC}} = 48.3\text{V}, \quad I_{\text{SC}} = 5.80\text{A}$$

$$\text{FF} = \frac{(V_{\text{MPP}}) \times (I_{\text{MPP}})}{(V_{\text{OC}}) \times (I_{\text{SC}})} = 0.767$$

3-7 节习题

1. 根据图 3-26 中的数据表,最大功率点的电压是多少?
2. “电池正常工作温度(Normal Operating Cell Temperature, NOCT)”指的是什么?
3. 在不超过系统最大电压的情况下,最多可以将多少组件并联连接?
4. 根据图 3-26 中的数据表,在 $200\text{W}/\text{m}^2$ 辐照度下的输出功率是多少?
5. 根据图 3-27 中的数据表,如果温度从 25°C 升高到 50°C ,输出功率将下降多少?



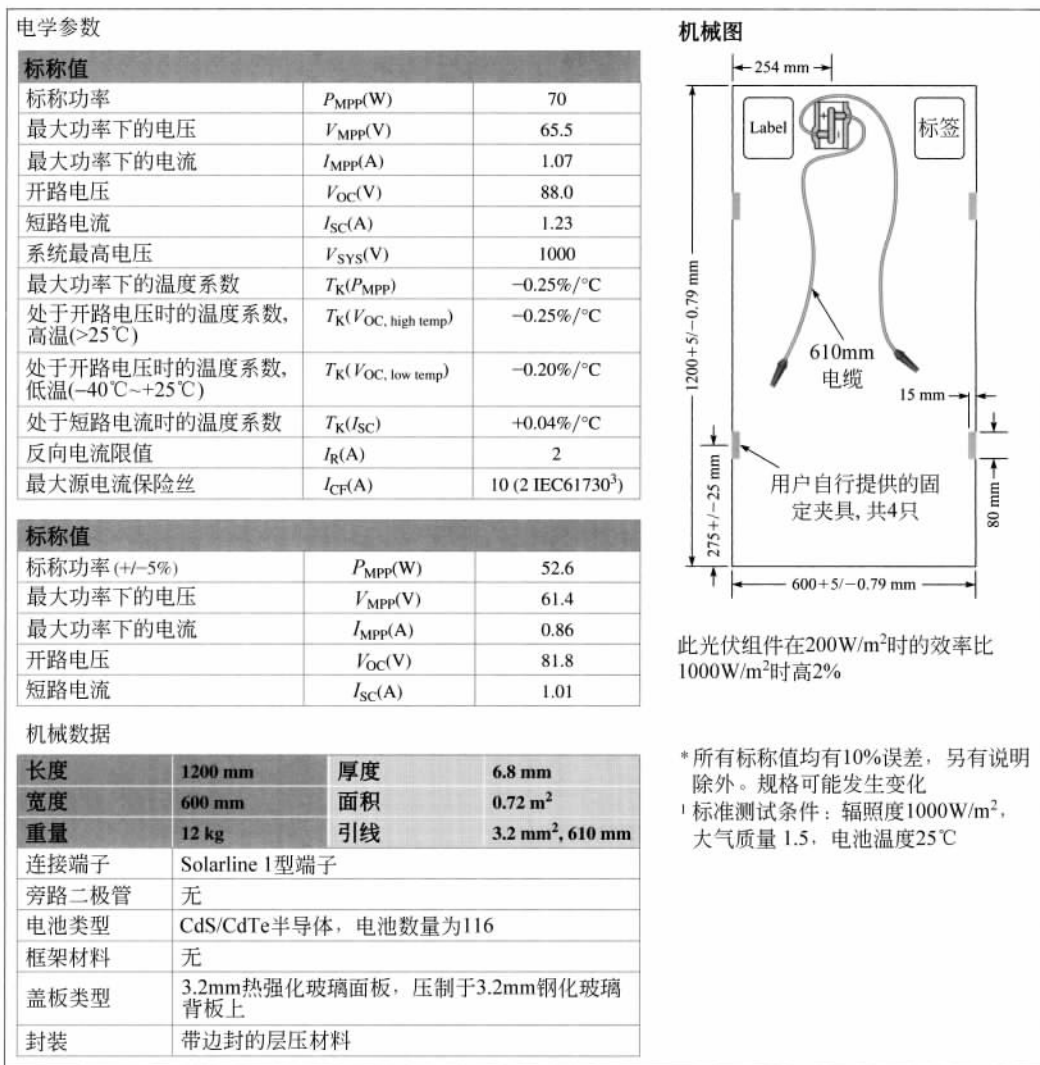


图 3-27 碲化镉薄膜组件数据表

3-8 聚光式光伏

读者可能有用放大镜聚焦太阳光在树叶或纸上烧出小洞的经历。聚光式光伏的原理与之类似, 不同之处在于透镜聚焦的光束不再是用于在树叶或纸片上烧出小洞, 而是由光伏电池吸收转化为电能。聚光式光伏电池与普通光伏电池相比具有特殊的抗热性能。

聚光式光伏(concentrating photovoltaic, CPV)系统使用透镜或反射镜将太阳光聚焦到光伏电池表面的小块面积上。透镜或反射镜必须始终朝向太阳, 以保证将太阳光持续聚焦至光伏电池表面。因此, 大多数聚光式光伏系统都采用单轴或双轴跟踪系统以追踪太阳逐日和季节性运动。如果通过散热器等适当的手段将电池PN结的温度保持在较低水平, 光伏电池在聚光下可获得的效率更高。有云条件下, 由于天空对光线的散射作用, 聚光系统无法对光线进行聚焦, 因此CPV系统在阴天的效率不高。对于相同的电池表面积, CPV系统的输出功率比普通光伏系统的输出功率高若干倍。半导体材料是光伏系

统中成本最高的部分,而 CPV 系统的主要优势就在于可大大降低对光伏电池数量的需求,从而达到降低成本的目的。

CPV 系统主要可分为三类:①低聚光型光伏系统,聚光系数为 $2\sim 100$;②中聚光型光伏系统,聚光系数为 $100\sim 300$;③高聚光型光伏系统(**high-concentration photovoltaic, HCPV**),聚光系数超过 300。HCPV 系统通常采用碟状反射器和菲涅耳透镜,也有采用锥形透镜的。图 3-28(a)所示为菲涅耳透镜与普通凸透镜的对比。菲涅耳透镜本质上是一块刻有同心环的薄平面镜。从中心向外,每个同心环的厚度逐步减小,光线向中轴汇聚。HCPV 系统多采用多结薄膜电池,主要材料为砷化镓。图 3-28(b)为透射式菲涅耳 HCPV 的基本原理示意图。图 3-28(c)为碟状反射式 HCPV,该系统同时使用反射(反射镜)和透射光路。图 3-29 为一典型的菲涅耳透镜阵列和碟状反射镜。

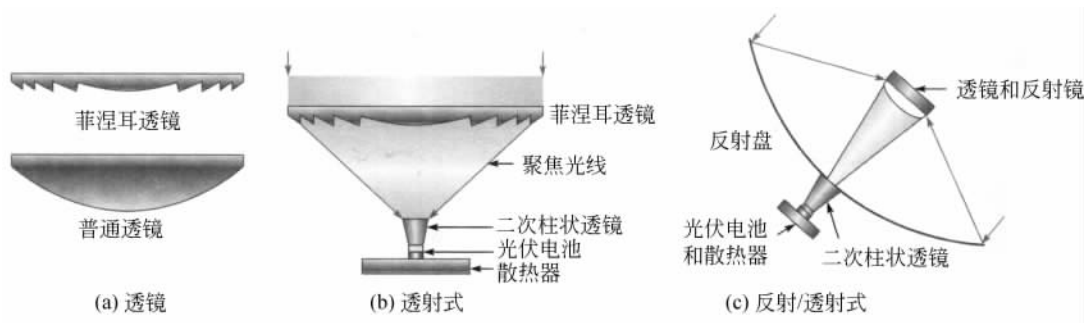


图 3-28 HCPV 系统的基本概念

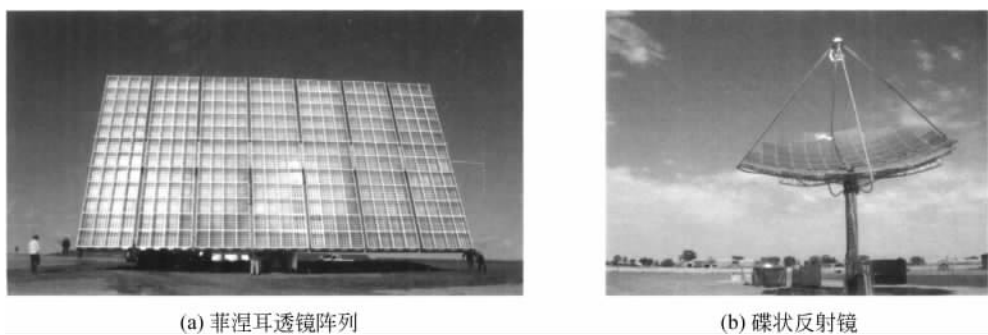


图 3-29 HCPV 系统代表

(来源:图(a)由国家可再生能源实验室提供;图(b)经许可复制,2011 Solar System Pty Ltd. 公司版权所有)

图 3-30 为 HCPV 与其他三种光伏系统的对比。每条曲线代表一种光伏系统从日出到日落随时间变化的输出功率变化,其表面积均相等。图 3-31 为典型的 HCPV 数据表。

3-8 节习题

1. CPV 和 HCPV 代表什么?
2. 说出用于 CPV 系统的两种非半导体组件。
3. 什么是菲涅耳透镜?
4. CPV 系统的主要优点是什么?

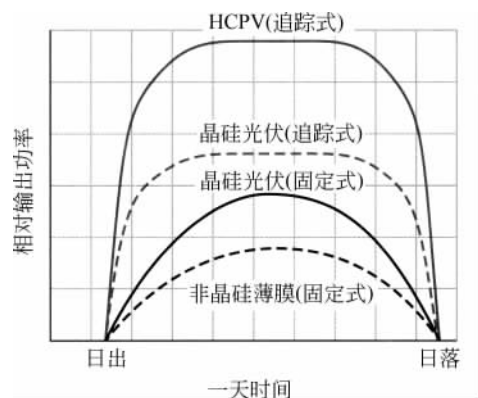
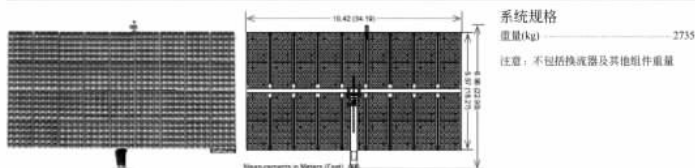


图 3-30 各种类型光伏系统输出功率曲线图

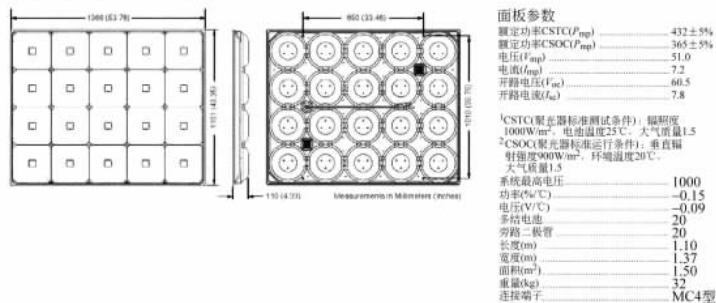
SolFocus.

SF-1136SX (432) 产品规格

SF-1136SX 系统



SF-1100P 面板(每个阵列36块面板)



SF-1136T 追踪器



SolFocus, Inc.
1941 Zanker Road • San Jose, CA 95112
Tel: +1 408.850.0300 • Fax: +1 408.850.0301 • www.solfocus.com

© SolFocus, Inc. Patents Pending. All Rights Reserved. SF-020 | MKT-000006 | 10.11

图 3-31 HCPV 组件(面板)和阵列数据表

(来源: © SolFocus)

总结

- 硅原子通过与周围的四个原子各共享一个电子构成共价键以形成晶体结构。
- 掺杂过程是将非常低浓度的杂质原子注入硅中以产生多余自由电子(N型杂质)或电子缺陷(P型杂质)。
- PN结在N型和P型半导体材料之间的边界处产生。
- PN结两侧的耗尽区内存在电场。
- 光伏效应是将太阳光转化为电能的基本物理过程。
- 切克劳斯基法是生产硅锭的常用技术。
- 晶圆形光伏电池由顶层反射层、栅格、硅掺杂区和背部导电层组成。
- 将硅原子中价带电子转化为自由电子所需的能量称为带隙能,其值为 1.12eV (电子伏特)。
- 光伏电池的输出电压受入射光照强度(辐照度)影响不大,但是电流和功率随辐照度的下降而下降。
- 光伏电池参数通常在总辐照度 $1000\text{W}/\text{m}^2$,温度 25°C ,大气质量1.5的标准测试条件下标定。
- 光伏电池的转换效率是指入射至电池表面的能量与转化为电能的比值。
- 光伏电池的填充因子是指电池的实际最大输出功率($V_{\text{MPP}} \times I_{\text{MPP}}$)与其理论最大输出功率($V_{\text{OC}} \times I_{\text{SC}}$)的比值。
- 光伏电池按照结构可分为晶圆形和薄膜型两种。
- 晶圆形光伏电池的常用材料为单晶硅和多晶硅。
- 薄膜光伏电池的主要材料为非晶硅、碲化镉、铜铟镓硒和砷化镓。
- 多结光伏电池可吸收的波长范围更广,因此比单结电池效率更高。
- 激光划片可将大面积薄膜光伏电池板切割为小块电池。
- 聚光式光伏(CPV)系统利用透镜或反射镜将太阳光聚焦至小块光伏电池表面。
- HPCV代表高聚光型光伏。HPCV分为透射式(使用透镜)和反射式(使用反射镜或反射镜与透镜的组合)两种。

关键名词

带隙能(band gap): 将原子价带电子解放为自由电子所需的能量。硅原子的带隙能为 1.12eV 。

聚光式光伏(concentrating photovoltaic, CPV): 使用透镜或曲面反射镜将阳光聚焦至光伏电池表面的技术。

结晶度(crystallinity): 表征原子在晶体结构内排列的有序程度。

掺杂(doping): 可精确控制的增加半导体材料电导率的工艺。

转换效率(efficiency): 入射至电池表面的能量与产出电能的比值。

填充因子(fill factor, FF): 光伏电池实际最大输出功率与其理论最大输出功率的比值。

自由电子(free electron): 不受原子束缚的电子,也称为载流电子。

高聚光型光伏(high-concentration photovoltaics, HCPV): 聚光倍率超过300的光伏电池。HCPV通常采用碟状反射镜和菲涅耳透镜,也有使用锥形透镜的。

空穴(hole): 原子共价键中由于价电子成为自由电子而产生的缺陷。

多结(multijunction): 将两块或多块单结光伏电池按照带隙能降序排列而成的薄膜光伏电池。

光子(photon): 太阳光中传输能量的波包。

光伏电池 (photovoltaic cell, PV cell): 使用经过掺杂形成 PN 结的硅晶圆或薄膜, 可将太阳能直接转化为电能的装置。

光伏效应 (photovoltaic effect): 将光能转化为电能的基础物理过程。

PN 结 (PN junction): N 型半导体和 P 型半导体之间的边界。

太阳能阵列 (solar array): 太阳能组件的组合。

太阳能组件 (solar module): 多个光伏电池的组合, 以输出特定的功率、电压和电流。

薄膜光伏 (thin-film photovoltaics): 利用厚度小于 1 微米至数微米之间的半导体材料制成的光伏电池。

价电子 (valence electrons): 原子外层电子。

公式

$$\text{公式 (3-1)} \quad \text{efficiency} = \left[\frac{P_{\text{OUT(MAX)}}}{E \times A} \right] \times 100\% \quad \text{光伏电池效率}$$

$$\text{公式 (3-2)} \quad \text{FF} = \frac{(V_{\text{MPP}}) \times (I_{\text{MPP}})}{(V_{\text{OC}}) \times (I_{\text{SC}})} \quad \text{光伏电池填充因子}$$

判断题

判断以下的说法是正确还是错误, 答案见本章末尾。

1. PV 为“photovoltaic(光伏)”的缩写。
2. 光伏电池和太阳能电池是不同的。
3. 光伏电池是基于 PN 结工作的。
4. 表面积大的光伏电池的输出电压比表面积小的光伏电池高。
5. 将光伏电池串联连接可提高输出电流。
6. 入射至光伏电池表面的阳光辐照度决定了输出电流的值。
7. 当光伏系统上方有云时光伏电池的输出电压将大大降低。
8. 多块光伏电池可组成组件(面板), 多块组件可组成阵列。
9. 晶圆形和薄膜型光伏电池的生产工艺是相同的。
10. 铋化镉可用于制作薄膜光伏电池。
11. 薄膜光伏电池的硬度非常大。
12. CIGS 是“calcium-indium-gallium-selenide(钙铟镓硒)”的缩写。
13. 聚光式光伏(CPV)系统使用透镜或反射镜将阳光聚焦至光伏电池表面。
14. 菲涅耳透镜厚度很大且很重。
15. 光伏电池的散热是高聚光式光伏(HCPV)系统的主要问题。
16. 砷化镓是高聚光式光伏(HCPV)系统中常用的光伏电池材料。

选择题

请选择正确的答案完成每个句子, 答案见本章末尾。

1. 硅可与()进行掺杂。
a. 硼 b. 镓 c. 铋 d. 以上都可以
2. 单晶硅光伏电池由()组成。
a. PN 结 b. 接触栅线

- c. 透明导电氧化物层(TCO) d. (a)和(b)都是
3. 光伏电池的输出电压随()的增长会有少许增长。
a. 表面积 b. 入射光强 c. 波长 d. 以上都不是
4. 光伏电池的输出功率随()的增长而增长。
a. 入射光强 b. 表面积
c. 一天中光照的时间 d. (a)和(b)都是
5. 更高的填充因子表示()。
a. 更高的输出电压 b. 更高的输出功率
c. 更大的表面积 d. 更多的半导体层
6. 与单一光伏电池相比,与特定负载并联连接的 32 块光伏电池意味着()。
a. 输出电压的增加 b. 输出电流的增加
c. 转换效率的增加 d. 输出功率的降低
7. 为使由 24 块电池组成的光伏组件的输出电压达到 12V,必须()。
a. 将电池并联连接 b. 提高入射光强度
c. 降低温度 d. 将电池串联连接
8. 为从某一特定光伏组件获取更高的输出功率,必须()。
a. 将电池并联连接 b. 将电池串联连接
c. 提高电池的转换效率 d. 以上都可以
9. 与单结电池相比,多结电池()。
a. 效率更高 b. 价格更低 c. 耐用性更好 d. 表面积更大
10. 波长为 500nm 的光是()。
a. 紫外光 b. 可见光 c. 红外光 d. 微波
11. 光子能量随()的增长而增长。
a. 月亮位置 b. 频率 c. 波长 d. 云层覆盖量
12. 激光划片是用于()。
a. 光伏电池测试 b. 在组件上刻划部件编号
c. 将薄膜光伏材料切割为小块电池 d. 以上均不是
13. 薄膜光伏电池一般不使用()。
a. CdTe b. c-Si c. CIGS d. GaAs
14. 空气质量系数与()有关。
a. 大气重量 b. 用于冷却 HCPV 电池的空气量
c. 太阳光穿透大气的光路 d. 以上均不是

问答题

1. 某光伏电池表面的辐照度(E)为 $800\text{W}/\text{m}^2$ 。如果该光伏电池尺寸为 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$,输出的电流和电压分别为 2.5A 和 0.5V ,请问该电池转换效率为多少?
2. 假设某光伏电池的转换效率为 18% 。如果该电池的尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$,请问在辐照度为 $950\text{W}/\text{m}^2$ 的情况下该电池的输出功率为多少?
3. 将 6 块由 24 块光伏电池串联组成的电池组件并联连接,假设每块电池在最大功率点的输出电

流和电压分别为 2A 和 0.5V。请计算该电路在最大功率点的输出电流、输出电压和输出功率。

4. 要获得 32V 输出电压的光伏组件,共需要多少块光伏电池,它们之间应如何连接(假设每块电池的输出电压为 0.5V)?

5. 如果题 4 中每块光伏电池的输出电流为 3A,要在 32V 输出电压下获得至少 20A 的电流,共需要多少块光伏电池,它们之间应如何连接?

6. 某装置需要 36V 电压以及至少 2kW 的额定功率。若使用输出电流和电压分别为 4A 和 12V 的 36 电池组件,请问共需要多少组件,它们之间应如何连接?

7. 如果题 5 中光伏阵列的输出电压不变,如何将其输出电流增加 3 倍?

8. 如果一周中有云层覆盖的时间为 40%,其余时间为晴天。当有云层覆盖时辐照度为 $200\text{W}/\text{m}^2$,晴天时的辐照度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 。请计算该周的平均辐照度。

9. 假设某电池的输出电流和输出电压分别为 2A 和 0.5V,若需要的总电压和总电流分别为 18V 和 4A,最少需要多少电池,它们应该如何连接?

10. 假设某光伏电池 $I_{\text{oc}}=3\text{A}$, $V_{\text{oc}}=0.55\text{V}$,在最大功率点的输出功率为 1.75W,请计算其填充因子。

11. 如果光波长从 400nm 变为 800nm,其能量改变多少?

12. 如果某光伏电池表面积为 0.5m^2 ,入射至其表面的辐照度为 $500\text{W}/\text{m}^2$,请计算由可见光、紫外光和红外光波段贡献的功率。如果该辐照度下工作 10 小时,产生的电能为多少千瓦时?

讨论题

购买光伏发电系统时,如果不需要考虑空间因素,其最重要的指标是什么?如果需要考虑空间因素,你的答案又会如何变化?

习题答案

3-1 节

1. 波尔模型是原子的行星模型,模型中电子沿特定轨道绕含有质子和中子的原子核旋转。
2. 向纯硅中掺杂诸如磷或者砷之类的五价物质。
3. 向纯硅中掺杂诸如硼或者镓之类的三价物质。
4. PN 结为 N 型和 P 型半导体之间的边界。
5. 由于电荷迁移而产生的电场。

3-2 节

1. 除了 N 型区、P 型区及两者之间边界区域,还包括防反镀膜层、顶部导电栅线和底部导电层。
2. 栅线可允许光线穿透入电池内部。
3. 形成电子-空穴对并在 PN 结两端产生电势。
4. 带隙能是将价电子从价带解放成为自由电子所需的能量。
5. 电子-空穴对是由于电子从晶体结构中摆脱束缚成为自由电子后在晶格中留下的缺陷。

3-3 节

1. 单晶半导体;多晶半导体;非晶硅薄膜半导体。
2. TCO 是透明导电氧化物(Transparent Conducting Oxide),可传导电流并可作为光伏电池的电极。
3. 成本低,生产工艺简单。

4. 染料可将光电阴极敏化。

3-4 节

1. 吸收更多的入射光以提高电池效率。
2. 400~700nm。
3. 更长。
4. 紫光的波长比红光更短,因此能量更高。

3-5 节

1. 0V。
2. 0.53V。
3. 能量必须等于或高于带隙能。
4. 影响转换效率的因素包括:电池类型、电池表面反射率、热力学系数极限、量子效率、最大功率点和内阻。
5. 更好。
6. 填充因子是指电池的实际最大输出功率($V_{MPP} \times I_{MPP}$)与其理论最大输出功率($V_{OC} \times I_{SC}$)的比值。

3-6 节

1. 电压。
2. 36、72 或 96 块电池。
3. 用于产生特定输出功率、电压和电流的多块光伏电池的组。
4. 光伏组件的组。
5. 阴天(包括多云)、光伏电池未直接朝向太阳或夜晚。

3-7 节

1. 39.8V。
2. NOCT 为 $45^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。无限制。
3. 根据图标, $I=1.2\text{A}$, $V=37\text{V}$, 因此最大功率约为 44W。
4. 对于 $T>25^{\circ}\text{C}$, 系数为 $-0.25\%/^{\circ}\text{C}$ 。输出功率将降低 $-0.25\%/^{\circ}\text{C} \times 25^{\circ}\text{C} = -6.25\%$ 。

3-8 节

1. CPV 代表 concentrating photovoltaic; HCPV 代表 high-concentration PV。
2. 反射镜或透镜,跟踪器和散热器。
3. 刻有同心环的薄平面镜。
4. 同等输出功率条件下电池的表面积小得多。

判断题答案

- | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 1. T | 2. F | 3. T | 4. F | 5. F | 6. T | 7. T | 8. T | 9. F |
| 10. T | 11. F | 12. F | 13. T | 14. F | 15. T | 16. T | | |

选择题答案

- | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 1. d | 2. d | 3. b | 4. a | 5. b | 6. b | 7. d | 8. d | 9. a |
| 10. b | 11. b | 12. c | 13. b | 14. c | | | | |