

第一章

太阳能电池基础及发展 >>>>

21 世纪以来,随着社会经济的发展,人类日常工作和生活中对能源的需求量也在不断增加。目前,煤炭、石油和天然气等化石燃料在世界能源消费结构中仍占据主导地位。由于化石能源在地球的存储量有限,且燃烧后会带来灰尘和烟雾,因此,化石能源的大量使用不仅造成了能源储量的日益减少,而且给人类的生存环境也带来了巨大的影响。化石能源在燃烧过程中所产生的污染物导致了气候异常和环境恶化,这一点已为人们所共知。能源是人类文明和社会经济发展的重要基础,是国家可持续发展的根本保障。从社会发展的长远角度来看,合理使用能源、调整能源结构与保护生态环境必须是统一的,开发、利用可再生能源势在必行。随着化石能源的日渐枯竭和环境问题的日益突出,能源已成为每个国家都必须高度重视的战略资源。为此,世界各国都在加紧对新能源的开发利用,希望通过新能源来替代传统的、不可再生的化石能源,实现能源的可持续利用。



第一节 概 述

一、新能源

新能源是指传统能源之外的各种形式的能源。相对于传统能源而言,新能源是在新技术、新工艺基础上,系统地开发、利用的可再生能源,如太阳能、风能、生物质能、氢能、海洋能、地热能等,它们都属于新能源,或称为清洁能源。长期以来,化石能源的大量使用给全球带来了严重的环境污染、气候异常和能源短缺等问题,寻找来源丰富的清洁能源已成为当今世界面临的最为重要的问题之一。新能源具有环保和可再生的特质,能够满足人类社会可持续发展对能源的需求,对新能源的开发利用也是治理环境和保护生态的长期措施。

我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国,煤炭约占商品能源消费结构的 76%,对煤炭的过度依赖已成为国内大气污染的主要根源。因此,调整能源消费结构,提高新能源和可再生能源的利用率,将成为减少环境污染的重要措施。我国能源发展战略明确提出:“要在提高能源利用效率、清洁使用化石能源、减少环保压力的同时,调整能源结构,增加替代能源,实现可持续发展”。

(1) **太阳能** 太阳能是太阳内部连续不断的核聚变反应过程中所产生的能量。太阳辐射到地球大气层的能量是其总辐射能量的 $1/(22 \times 10^8)$ (约为 3.75×10^{26} W),

太阳每 1s 照射到地球上的能量相当于 500 万 t 标准煤。其能量巨大,而且太阳能既是一次能源,又是可再生能源,它清洁环保,对环境无任何污染,是人类追求的理想能源。但从能源利用的角度来讲,太阳能有两个主要的缺点:一是能流密度低;二是分布很分散,其辐照强度受地理、气候等因素的影响较大。以上缺点大大限制了太阳能资源的有效利用。

(2) **风能** 风能是空气流动而产生的动能,是一种完全清洁的能源,分布广泛,永不枯竭,其主要利用方式以风力发电为主。风能是可再生能源中发展最快的清洁能源,具有大规模开发利用的潜力。我国是风能资源大国,据初步估算,50m 高度陆地可利用的风能资源为 60~100GW,相同高度海上可利用的风能资源为 10~20GW,位居世界第三。然而风能资源具有断续分散的特点,受地理位置和季节影响也比较大,这是风力发电中必须要考虑的问题。

(3) **生物质能** 从广义上讲,生物质能是直接或间接来源于太阳能,并以有机物形式存储的能量,是一种天然可再生、富含能量、可替代化石燃料的含碳资源。地球上的生物质能资源较为丰富,地球每年经光合作用产生的生物质有 1730 亿 t,其中蕴含的能量相当于全世界能源消耗总量的 10~20 倍,但大多数生物质能资源客观上属于未能被完全开发利用的废弃物,其利用率不到 3%。所以,从这一角度看,仍有较大的资源开发利用潜力。

(4) **氢能** 氢能是指以氢及其同位素为主导的反应中,或氢在状态变化过程中所释放的能量。它可以产生于氢的热核反应,也可来自氢与氧化剂发生的化学反应。前者称为热核能或聚变能,其能量非常巨大,通常属核能范畴;后者称为燃料反应的化学能,就是人们通常所说的氢能。氢能属于二次能源,需要通过其他能源转化后才能被获得。与电能和热能相比,氢能最大的特点是可以大规模地以物理形式和化学能形式储存。氢能的来源十分广泛,如氢气可从传统能源中通过分解和化学反应获得,也可通过水的电解制取,还可以通过光化学催化反应获得。但总体上来讲,氢能的制取成本高,而且难以存储。

(5) **海洋能** 海洋能是一种蕴藏在海洋中的可再生能源,分为波浪能、潮汐能、海流能、温差能、盐差能 5 种。海洋能在海洋总水体中的蕴藏量巨大,但单位体积所拥有的能量较小。我国大陆海岸线长达 18000km,拥有 6500 多个大小岛屿,海岛的岸线总长约 14000km,海域面积约为 470 万 km^2 ,有丰富的海洋能资源。海洋能发电是最常见的海洋能利用形式,其中潮汐能是目前最成熟的海洋能利用技术。

二、太阳能资源的特点

太阳能与煤炭、石油、天然气等常规能源相比,具有明显的优点。太阳能清洁无害,无任何污染,对环境影响小,利用价值高;可直接开发和利用,无须运输;储量丰富,每年到达地球表面的太阳辐射能约相当于 130 万亿 t 标准煤,其总量属现今世界上可以开发的最大能源;取之不尽,用之不竭,可供人类永远利用;分布广,有利于小

规模分散利用。

太阳能资源虽然具有以上的优点,但作为能源利用时,也存在不少问题。虽然到达地球表面的太阳辐射能总量很大,但是太阳能能量密度较低。在北回归线附近,夏季天气较为晴朗的情况下,正午时太阳辐射的辐照度最大,在垂直于太阳光方向 1m^2 面积上接收到的太阳能平均有 1000W 左右;若按全年日夜平均,则只有 200W 左右。而在冬季大致只有一半,阴天一般只有 $1/5$ 左右,开发利用需要较大空间。太阳能分布分散,不同地域的太阳辐射能差异较大。由于受到昼夜、季节、地理纬度和海拔高度等自然条件的限制,以及阴、晴等气象状况的影响,到达地面不同位置的太阳辐照度,既是间断的又是极不稳定的,这给太阳能的大规模应用增加了难度。

三、我国太阳能资源

我国地处北半球,南北距离和东西距离都在 5000km 以上,太阳能资源非常丰富, $2/3$ 以上国土面积的地区年日照时数在 2200h 以上,每年太阳能理论储量达 17000 亿 t 标准煤,太阳能资源有着极大的开发利用潜力。

在我国,根据各地接受太阳总辐射量的多少,可将全国划分为四类地区。我国太阳能资源分布划分见表 1-1。

表 1-1 我国太阳能资源分布划分

分 类	太阳能资源	地 区	日辐射量 (kWh/m^2)
一类地区	最丰富	宁夏北部、甘肃北部、新疆东部、青海西部和西藏西部	5.1~6.4
二类地区	较丰富	河北西北部、山西北部、内蒙古南部、宁夏南部、甘肃中部、青海东部、西藏东南部和新疆南部	4.1~5.1
三类地区	中等	山东、河南、河北东南部、山西南部、新疆北部、吉林、辽宁、云南、陕西北部、甘肃东南部、广东南部、福建南部、江苏北部、安徽北部、台湾西南部、湖南、湖北、广西、江西、浙江、福建北部、广东北部、陕西南部、江苏南部、安徽南部、黑龙江、台湾东北部	3.2~4.1
四类地区	较差	四川、贵州	2.5~3.2

四、太阳能光伏发电的现状与前景

我国的常规能源储量远远低于世界的平均水平,大约只有世界总储量的 10% 。随着常规能源的逐渐枯竭,以及环境问题的日益突出,国家必须逐步改变能源消费结构,大力开发以太阳光为代表的新能源。在各种新能源中,太阳能储量丰富,开发利

用时几乎不产生任何污染,是人类最理想的替代能源,具有极大的开发利用潜力。太阳能开发利用的途径主要有两种:一种是太阳能的光热利用,主要以太阳能热水器的应用为代表;另一种是太阳能的光电利用,主要以太阳能光伏发电的应用为代表。这两种方式都具有无污染、可持续、应用方式灵活等优点,是世界各国发展新能源与可再生能源的重点。就太阳能光伏发电而言,根据国际能源机构(JRC)的预测,到2030年,可再生能源在总能源结构中将达到30%以上,而太阳能光伏发电在世界总电力供应中的比例也将达到10%以上;到2040年,可再生能源将在能源结构中占到50%以上,太阳能光伏发电将占总电力的20%以上;到21世纪末,可再生能源在能源结构中将达到80%以上,太阳能光伏发电将占到60%以上。

(1)世界太阳能光伏发电的发展现状 太阳能光伏发电产业在世界各国政府的支持下,近年来有了飞速的发展。受全球太阳能光伏市场需求的影响,太阳电池产量增长最为迅猛。2008年全球太阳电池产量为6.85GW,到2009年增长为10.66GW,而2010年则达到20.5GW,几乎比2009年翻了近1倍。多晶硅产量也在逐年上升,2009年多晶硅产量为11万t,而2010年多晶硅产量达到16万t。20世纪60年代第一个地面应用的光伏组件售价为1500美元/W,然后光伏组件的售价逐渐降到300美元/W。由于技术进步和生产规模扩大等因素的推动,光伏组件价格不断降低,尤其是21世纪以来,光伏组件的生产成本已经大幅度下降。在2000年,光伏组件的价格为4.5美元/W;而到了2010年,则下降到1.7美元/W。

从2007年开始,世界光伏市场呈现出爆炸式增长的趋势。2007年世界累计光伏装机容量为12.3GW;至2010年,光伏装机容量累计达到39.6GW,近5年年均增长率超过50%。据欧洲光伏工业协会(EPIA)提供的数据,2000~2010年世界主要国家和地区光伏装机容量如图1-1所示。2010年全世界新增光伏装机容量16.6GW,相比2009年的7.2GW增长了230%。

2011年,由于光伏组件价格和其他成本快速下降,当年的装机容量大幅增长。据欧洲光伏工业协会统计,2011年世界新增装机容量27.7GW,累计装机容量67.4GW。2012年,世界光伏新增装机容量为30.5GW。根据《2013中国光伏产业发展报告》的统计数据,2012年全球光伏市场份额中,德国占24.5%,意大利和美国分别占10.6%和10.3%,日本占6.5%,而中国则增长到了14.5%。这表明中国已开始逐步走向光伏市场的中心。2013年之后,世界光伏市场将进入新的稳定增长期。

(2)我国太阳能光伏发电的发展现状 我国从1958年开始了太阳电池的研究,1959年生产出第一块具有实用价值的太阳电池,1971年首次将太阳电池成功应用在人造卫星上。经过不断努力,我国生产的太阳电池的转换效率也在不断提高,目前单晶硅太阳电池实验室效率已经达到25%,批量生产效率为16%~18%;多晶硅太阳电池批量生产效率也已达15%~17%。从20世纪70年代太阳电池的成功应用开始,我国太阳能光伏发电技术已有了很大的进步,其应用领域也不断扩大,从军事

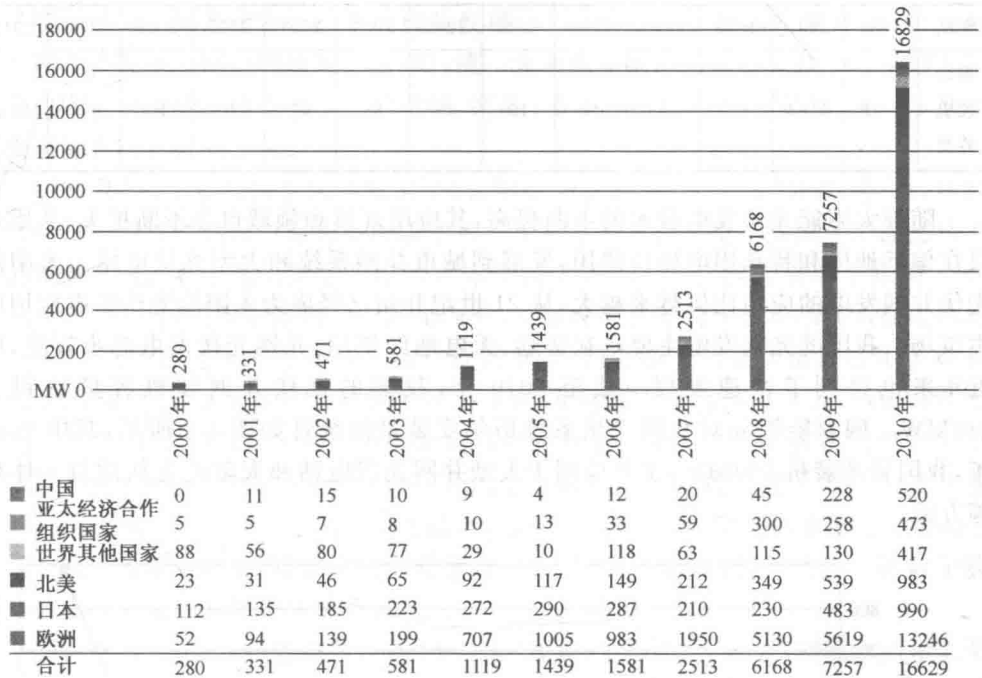


图 1-1 2000~2010 年世界主要国家和地区光伏装机容量 (MW)

领域、航天领域逐渐进入通信、交通、气象、农村电气化等多个领域。

20 世纪 80 年代中后期,我国的太阳能电池生产能力达到 45MW,光伏产业初步形成。进入 20 世纪 90 年代后,我国太阳能光伏产业稳步发展,产量逐年增加。特别是近年来启动的“光明工程”和“送电到乡”工程,极大地推动了光伏产业的发展。自 2002 年以来,连续多年以 100% 以上的年增长率快速发展。2006 年,我国太阳能电池产量占世界总产量的 17.1%,位居世界第三。2007 年,我国太阳能电池产量达到 1.088GW,占世界总产量的 27.2%,首次超过德国和日本,成为世界太阳能电池的第一大生产国。此后,2008 年、2009 年和 2010 年我国连续三年太阳能电池产量仍是世界第一,其中 2010 年太阳能电池产量约为 10GW,占全球总产量的 50%。作为新能源产业的主要代表,光伏产业在我国发展迅速,并成长为国际新能源市场上举足轻重的力量,中国也成为全球光伏产品的主要生产国。

我国光伏发电市场发展较为缓慢,远远落后于太阳能电池产量的增长。在 20 世纪 70 年代,太阳能电池在地面的应用非常有限,而后随着光伏产业初步形成,在地面的应用开始发展,光伏市场才逐步扩大。1996 年,我国的光伏发电累计装机容量仅为 1.0MW,到 2010 年末累计装机容量达到 893MW,占世界的份额从 1996 年末的 0.2% 上升到 2.2%。1990 年以来我国太阳能光伏发电累计装机容量见表 1-2。

表 1-2 1990 年以来我国太阳能光伏发电累计装机容量 (MW)

年度	1990	1995	1996	1998	1999	2000	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2010
累计装机容量	1.78	6.63	1.0	5	10	19	45	55	65	70	80	100	893

随着太阳能光伏发电技术的不断提高,其应用规模和领域也在不断扩大,从原来只在偏远地区和特殊用电场合使用,发展到城市并网系统和大型光伏电站。太阳能光伏并网发电的应用比例越来越大,从 21 世纪开始已经成为太阳能光伏发电应用的主市场。我国的光伏发电主要是在边远、无电地区使用,并网光伏发电起步较晚,但近年来也得到了快速发展。截至 2010 年,我国的光伏并网装机容量达到了 240MW。国家能源局对我国光伏系统历年安装量的统计如图 1-2 所示,其中 2010 年,我国新增装机 500MW,主要应用于大型并网光伏电站和太阳能光伏建筑一体化等方面。

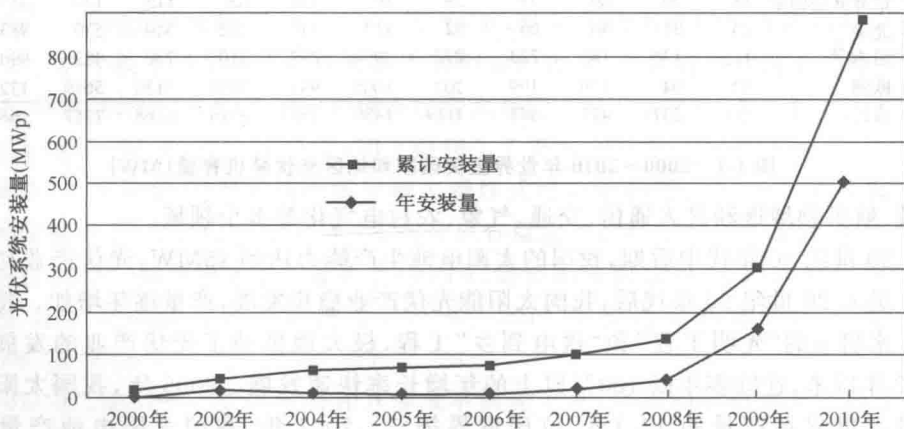


图 1-2 我国光伏系统历年安装量的统计

2012 年,我国光伏发电的年安装量为 4.5GW,相比 2011 年增幅达到 66%,截至 2012 年底,我国太阳能光伏发电装机容量已跃居世界第三位。

(3)我国太阳能光伏发电的发展规划 我国制定了一系列政策鼓励太阳能光伏发电的发展。2007 年 8 月 31 日发布了《可再生能源中长期发展规划》,明确提出将逐步提高可再生能源在我国能源消费中的比重,在 2010 年达到 10%,预计到 2020 年达到 15%左右,其中太阳能光伏发电累计为 1600MW。太阳能产业已纳入国家战略性新兴产业,并会给予重点扶持。

为促进我国太阳能光伏发电市场的形成,2009 年,国家相继出台了《太阳能光电建筑应用财政补助资金管理暂行办法》和《关于实施金太阳示范工程的通知》等政策,为我国的太阳能屋顶和光伏建筑项目提供补助。此外,还先后启动了两批大型光伏

并网电站特许权招标项目,在西部太阳能资源优势地区建成了一批并网光伏电站。为继续推进太阳能光伏发电产业化发展,2011年8月1日国家发布《给予完善太阳能光伏发电上网电价政策的通知》,统一太阳能发电上网电价。这一政策给太阳能光伏发电的市场应用带来了新的希望,提高了国内光伏企业的积极性,进一步推动了太阳能光伏发电的发展。

2012年初,工业和信息化部制定了《太阳能光伏产业“十二五”发展规划》,从经济目标、技术目标、创新目标和发电成本目标4个方面明确提出了我国太阳能光伏产业的发展方向。其中光伏发电的成本目标是到2015年,光伏组件成本下降到7000元/kW,光伏系统成本下降到1.3万元/kW,发电成本下降到0.8元/kWh,配电侧达到“平价上网”,使光伏发电具有一定经济竞争力;到2020年,光伏组件成本下降到5000元/kW,光伏系统成本下降到1万元/kW,发电成本下降到0.6元/kWh,在发电侧实现“平价上网”,在主要电力市场实现有效竞争。成本过高一直是影响太阳能光伏发电大规模应用的主要障碍,降低光伏系统的发电成本将会进一步拓宽光伏发电的应用领域。除了大型并网光伏电站外,分布式光伏发电、建筑一体化光伏发电等中小型光伏发电系统,也将成为国内光伏发电市场需求增长的新兴动力。这对于我国整体光伏产业的有序发展极为有利。

国家能源局在《太阳能发电发展“十二五”规划》中提出“十二五”期间将新增太阳能光伏装机容量20GW,并且要大力发展分布式光伏发电,在接下来的《关于申报分布式发电规模化应用示范区的通知》中进一步对“十二五”期间各省的分布式发电装机目标提出了不超过500MW的要求,鼓励各省在国家补贴政策基础上,以适当方式支持分布式光伏发电示范区建设。国家电网也对此给予了相应的政策支持,在审批手续和上网接入等方面提供便利条件。由于国家的政策扶持,对光伏发电的补贴力度加大,如光伏发电上网电价仍然维持在1元/kWh,对自发自用和余电上网部分进行补助等,有利推动了我国光伏应用市场的发展。“光伏建筑一体化”“金太阳工程”等项目的稳步、快速实施,证明我国的光伏发电进入了一个全新的发展阶段。

(4)太阳能光伏发电面临的问题 目前,制约太阳能光伏发电规模化发展的主要原因依然是成本。近年来,随着多晶硅材料价格的大幅下降,还有太阳电池生产技术和效率的提高,光伏发电成本已大幅下降,但仍大大高于常规发电成本。我国太阳能光伏发电与发达国家相比,仍存在较大差距。我国光伏产业发展中仍然面临许多问题。

①光伏技术研究和产业化水平与国外相比存在差距。我国研制的太阳电池,如单晶硅和多晶硅电池,实验室转换效率均比世界先进水平低5%,商业化电池转换效率低2%~3%。国内真正具有产业规模和掌握核心技术的企业很少。生产太阳电池需要高纯的多晶硅,但目前我国的提炼技术比较落后。与国外水平相比,国内多晶硅的提炼纯度较低,但能耗却高2~3倍,而且环境污染严重。因此,我国制造太阳电池的高纯的多晶硅,90%以上只能依赖进口,直接影响太阳电池的生产和产品成本,

导致光伏发电成本较高。

②太阳能光伏设备落后,专用原材料国产化程度不高,国内约 1/3 的光伏设备依赖进口,还有部分设备的性能指标和可靠性仍待提高。如多晶硅铸造炉、线切割机、破锭机等需要进口。PEVCD 氮化硅沉积设备、丝网印刷机、电池片分选机、串联焊接机等性能也不能满足现代化生产需要,需要全套引进。国内新建的大型太阳电池生产线的关键设备几乎全部进口,国产化配套率很低,而且核心关键技术仍然需要进行研究和突破。

③硅材料基本上依靠进口,而国内生产的光伏产品绝大部分销往国外,即“两头在外”,市场高度依赖国外市场。此外,市场竞争激烈也是不容忽略的事实。目前从全球光伏市场来看,处在供过于求的状况,而且在短期内难以改变。

目前,国内太阳能光伏应用在技术标准、管理规程、质量监测系统等方面还很不完善,包括光伏产品质量检测认证体系和管理办法,统一的光伏系统设计规范,光伏系统的运行、维护和管理规范等。在太阳能光伏发电并网方面缺乏完善的技术标准和管理要求,尚未建立起分布式电源接入电网的运行机制,没有形成合理的上网电价机制,光伏建筑一体化系统没有统一的技术标准,这些问题阻碍了光伏并网发电的发展。

(5)太阳能光伏发电的前景 太阳能光伏发电是 21 世纪最具发展前景的发电技术,也是太阳能利用的重要形式,太阳能光伏发电在 21 世纪不但会替代部分常规能源发电,而且将成为世界能源供应的主体。世界能源组织预测 2020 年,世界太阳能光伏发电的发电量占总发电量的 1%,2040 年占总发电量的 20% 以上。

发展太阳能光伏发电不仅可以解决化石能源的枯竭问题,而且是保护生态环境、治理污染的重要途径。化石能源在燃烧过程中会排放出大量污染物,如煤电的碳排放为 796.7g/kWh,燃油发电的碳排放量为 525g/kWh,燃气发电的碳排放量为 377g/kWh,而太阳能光伏发电的碳排放量为 33~50g/kWh,仅为化石能源发电碳排放量的 1/20~1/10,是很好的清洁低碳能源。我国太阳能光伏发电发展潜力巨大,将逐渐成为主流能源利用形式。

第二节 太阳电池基础和工艺

一、太阳能辐射

地球上能源的形成几乎全部直接或者间接地来自太阳辐射。太阳是一个大的火球,中心不断进行着核聚变反应,中心温度高达 2000 万 K,太阳表面层温度约 6000K。太阳辐射可近似地看成是由太阳表面层测试决定的黑体辐射。太阳表面总辐射功率高达 3.8×10^{23} kW,辐射到地球的仅 $1/(2 \times 10^9)$,即便如此,此值为人类目前所消耗总功率的数万倍。对人类来说,太阳能可被认为是取之不尽,用之不竭的清

洁能源。太阳光经过大气层,最终到达地面的太阳总辐射由太阳直接辐射和散射辐射组成。能到达地面的太阳辐射约占到达大气层上界太阳辐射的45%左右,并存在辐射不均现象,海拔高度越高、纬度越低,获得总辐射量越多,反之越少。

地球以椭圆形轨道绕太阳公转,公转一圈为一年,太阳处于椭圆形轨道其中的一个焦点上。所以,太阳与地球的距离每时每刻都在变化,地球所获得太阳辐射的能量按四季呈现有规律的变化。大约在每年1月2日至5日地球离太阳最近,大约在7月3日至4日地球离太阳最远。地球所接收到太阳辐射能量的多少取决于日地距离、昼长和太阳高度角等因素,且与太阳到地球距离的平方成反比。地球赤道平面与地球公转轨道平面有一个夹角,所以只有赤道上每天昼长、夜长均为12h,除赤道以外的其他地方会出现四季变化。正因为这些原因,使得地球所获得太阳辐射能量表现出不稳定的特点。

如图1-3所示,太阳辐射曲线中把太阳近似看成是6000K的黑体辐射。太阳光线大部分能量集中于短波波段,在红外区(波长 $>0.76\mu\text{m}$)、可见光区(波长范围 $0.4\sim 0.76\mu\text{m}$)和紫外区(波长 $<0.4\mu\text{m}$)分别约占太阳辐射总能量的50%、43%和7%,所以有时我们也把太阳辐射称为短波辐射。人类要开发利用太阳能资源,应该熟悉太阳辐射的这些基本规律。另外,大气层上太阳辐射曲线与到达地面的太阳辐射曲线存在很大的差异,主要是因为太阳光从大气层外辐射到地面时,大气层对太阳辐射的吸收和散热,这些吸收主要与太阳辐射的波长和大气层空气成分有关。在紫外和近紫外光部分,臭氧(O_3)层对其吸收较大;在可见光部分,氧气(O_2)和水蒸气(H_2O)对其吸收较大;在红外部分,水蒸气(H_2O)对其吸收较大。所以,地面太阳能电池设计和制作需要知道太阳光谱在地面的这些变化。

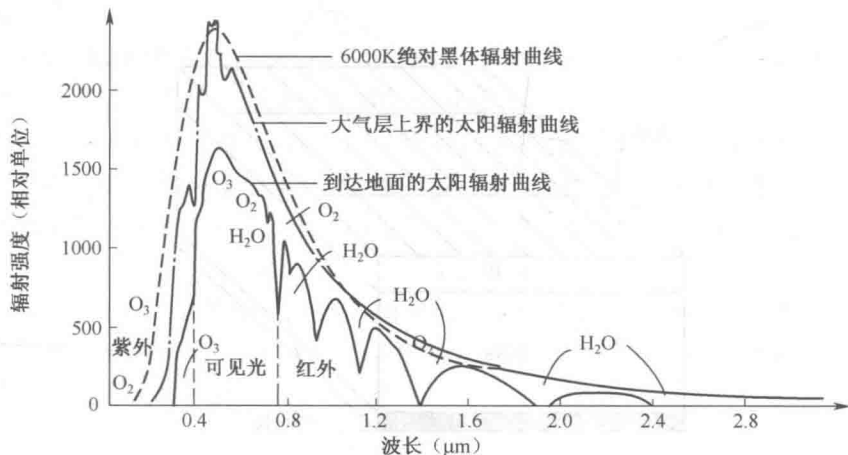


图 1-3 太阳辐射曲线

二、太阳常数

太阳常数 I_0 是指在日地平均距离上,大气层上界垂直于太阳光线的单位面积单

位时间内所接受的太阳辐射强度。由于没有大气层的影响,这个数值基本上是一个常量。在1981年10月召开的世界气象组织和观测方法委员会会议上确定太阳常数为 $1367\text{W}/\text{m}^2$ 。

三、太阳能电池结构和原理

目前最常见且产量最大的太阳能电池是晶体硅半导体太阳能电池,简称晶硅太阳能电池,一般晶硅太阳能电池主要由正电极、减反射层、发射区、基区、背电极5部分组成,其结构如图1-4所示。晶硅太阳能电池晶片通常选用P型晶体硅半导体材料作为半导体太阳能电池的基区,厚度为 $150\sim 400\mu\text{m}$,掺杂杂质为磷原子,浓度为 10^{15}cm^{-3} 。发射区一般为N型晶体硅半导体,厚度为十几微米,掺杂杂质为氮原子,浓度为 $10^{16}\text{cm}^{-3}\sim 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 。这样发射区与基区在交界面上共同构成一个P-N结。为了增大太阳光的吸收,一般要在发射区表面镀一层减反射膜层,针对晶硅太阳能电池的特点和工艺,减反射膜层材料为 SiO_2 或者 Si_3N_4 。减反射层的上表面有栅状金属电极,通常称为栅线,金属电极较宽的称为主栅,金属电极较细的称为细栅。一般太阳能电池表面有两个主栅,平均分布于太阳能电池表面;有几十根细栅,垂直于主栅平均分布于太阳能电池表面。正表面栅线一般由高纯银浆通过丝网印刷而成。硅片背面为金属背电极,背电极全部覆盖于太阳能电池背面,背电极一般通过银铝浆涂抹于背面。正电极和背电极分别与发射区和基区通过烧结形成欧姆接触,以减小电极与接触面的接触电阻。

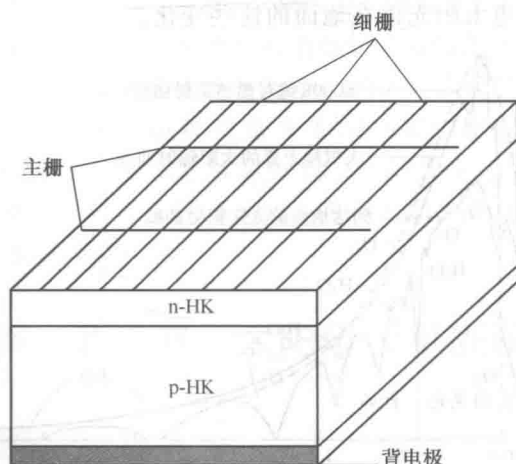


图 1-4 晶硅太阳能电池结构

当有入射光通过减反射膜层进入太阳能电池,能量大于或等于半导体禁带宽度时,能量的光子将激发电子-空穴对的产生。产生的电子-空穴对将被空间电荷区的内建电场分离,在空间电荷区两侧附近N区或P区产生的电子-空穴对通过扩散进入耗尽区再被分离,光生载流子只要在复合前能越过空间电荷区,将会有效地把光能转换

成电能。被分离的光生载流子,其中电子通过扩散运动到N区,空穴通过扩散运动到P区,这样便会在太阳能电池两侧(P-N结的两侧)积累带电量相反的电荷,从而形成光生电压,这便是光生伏打效应。

对于晶体硅太阳能电池,不同区域对波长段的光子吸收程度不同。靠近太阳能电池发射区对短波长的紫光、紫外光敏感,占全部光源电流的5%~10%;对可见光敏感的是P-N结空间电荷,产生的光生电流约占5%;太阳能电池基体区域对红外光敏感,产生的光生电流占80%~90%,是光生电流的主要组成部分。太阳能电池通过光生伏打效应在两极形成积累电势,在两极加负载后,光电流将会在积累电势的作用下从P区经负载流至N区,负载使电功率输出。

四、太阳能电池的电性能参数

描述太阳能电池电学性能的参数主要有5个:开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} (或短路电流密度 J_{sc})、最大输出功率 P_m 、填充因子 FF 和光电转换效率 η 。

(1)开路电压(Open Circuit Voltage) V_{oc} 开路电压,即将太阳能电池置于标准测试条件(光照强度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$,大气质量为AM1.5,环境温度 25°C)下,开路两端太阳能电池输出的电压值。在精度要求不高的情况下,可用高内阻的直流毫伏表近似测量太阳能电池的开路电压。

(2)短路电流(Short Circuit Current) I_{sc} 将太阳能电池置于标准测试条件下,当太阳能电池短路时,流过太阳能电池的电流即为短路电流。在精度要求不高的情况下,用内阻足够小(一般情况要求 $<1\Omega$)的电流表,可直接接在太阳能电池的两端近似测量短路电流。

(3)最大输出功率 P_m 最大输出功率随负载电阻值而变化,太阳能电池的工作电压和电流也将随之变化。用阻值不同的负载接入太阳能电池,测量出对应的工作电压和电流值绘制成的 $I-V$ 曲线,即太阳能电池的伏安特性曲线。 $I-V$ 曲线每一点上所对应电压和电流的乘积即输出功率,其最大值为最大输出功率(P_m),此时所对应的工作电压和工作电流称为最佳工作电压(V_m)和最佳工作电流(I_m),关系如下:

$$P_m = V_m I_m \quad (1-1)$$

(4)填充因子(Fill Factor) FF 填充因子 FF 是太阳能电池最大输出功率与开路电压和短路电流乘积之比,填充因子 FF 是反映太阳能电池电性能优劣的重要参数之一。其公式表达式如下式:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1-2)$$

由式(1-2)可以看出,由于最大电压和电流总是小于开路电压和短路电流,所以,填充因子的值始终 <1 ,数值越趋近1表示太阳能电池可能输出的功率越大,太阳能电池电性能越好。从实际应用来看,太阳能电池填充因子的实际值要低于式(1-2)所计算出的值,这主要是受太阳能电池串联电阻和并联电阻的影响。串联电阻主要影响短路电

流值,串联电阻增大,短路电流随之下降,填充因子相应降低;并联电阻主要影响开路电压值,并联电阻越小,开路电压随之下降,也会使填充因子变小。另外,从 $I-V$ 曲线上来看, FF 越大, $I-V$ 曲线越趋近于矩形,太阳电池转换效率越高。

(5) **太阳电池光电转换效率 η** 太阳电池置于标准测试条件下,给太阳电池连接最佳负载时,把太阳电池最大能量转换效率定义为太阳电池转换效率,其值等于太阳电池的输出功率与入射到太阳电池表面的太阳光入射功率之比:

$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{in} \cdot S} \quad (1-3)$$

式中, S 为太阳电池面积 (m^2); P_{in} 为太阳光入射功率 (W/m^2)。

在大气质量为 AM 1.5、入射的太阳辐照度为 $1000 \text{W}/\text{m}^2$ 、地面温度为 25°C 时,太阳电池的最大输出功率定义为太阳电池的峰瓦数 (W_p)。太阳电池的光电转换效率与制造太阳电池所用半导体材料禁带宽度有密切的关系,只有光子能量大于或等于禁带宽度的光子,才能在半导体中产生光生电子-空穴对,在没有复合前被内建电场有效分离,进而形成光生电流。但太阳电池材料的禁带宽度也并不是越小越好,因为能量大于禁带宽度的光子能量部分将转换为热能,不但降低了光子能量的利用率,还会因产生热能降低太阳电池的效率。禁带宽度还直接影响开路电压,禁带宽度越大,开路电压越高(反之越低),反向饱和电流越小(反之越大),故选择合适禁带宽度的电池材料,对太阳电池理论效率有较大影响。太阳电池的光电转换效率与电池的结构、结特性、材料性质、工作温度、放射性粒子辐射损伤和环境变化等有密切关系,是衡量电池质量和技术水平的重要参数。

五、太阳电池的表征

(1) **$I-V$ 特性曲线** 给太阳电池接入不同的负载,所获得的功率输出也就不一样,如果用一可变阻值的负载(让负载阻值变化范围尽可能大,最好为 $0 \sim \infty$)。伏安特性测试电路如图 1-5 所示。连接太阳电池,改变负载阻值 $0 \sim \infty$,并测量负载的电流与电压,便可绘出太阳电池伏安特性曲线如图 1-6 所示。

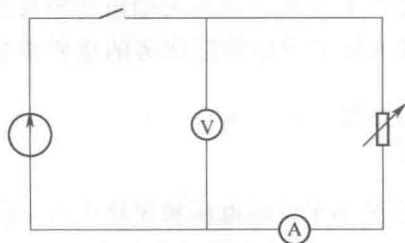


图 1-5 伏安特性测试电路

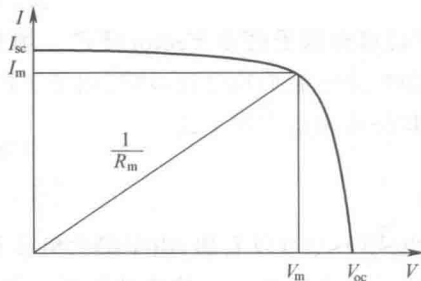


图 1-6 太阳电池伏安特性曲线

伏安特性曲线能反映许多太阳电池重要性质,如开路电压、短路电流、最大输出

功率、填充因子等。同时还可以通过 $V \rightarrow 0$ 时的曲线变化率,来定性判断太阳电池的并联电阻大小。并联电阻包括 P-N 结的漏电阻和电池边缘的漏电阻等,主要是由硅片边缘不清洁或体内缺陷引起的。当 $\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=I_{sc}} \rightarrow 0$ 时,并联电阻较大,太阳电池性能较好;反之,太阳电池性能较差。通过 $I \rightarrow 0$ 时的曲线变化率,来定性判断太阳电池的串联电阻大小,串联电阻主要包括扩散层的薄层电阻、基区材料本身的体电阻、电极与半导体的接触电阻、电极的电阻等。当 $\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_{oc}} \rightarrow \infty$ 时,串联电阻较小,太阳电池性能较好;反之,太阳电池性能较差。

(2) 载流子收集率 确定载流子收集坐标如图 1-7 所示,当光子进入太阳电池内部时,光子会激发载流子生成光生载流子(正负电子对)。同时进入太阳电池的光能量,会随进入太阳电池的深度呈负指数衰减。

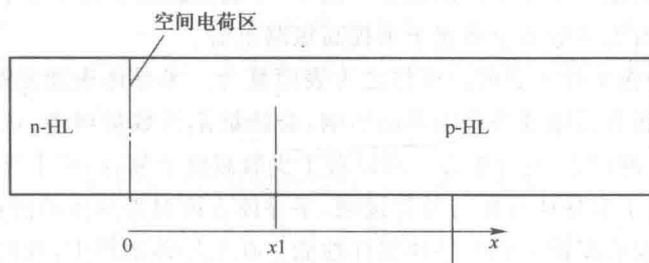


图 1-7 确定载流子收集坐标

但不是所有的光生载流子都能被 P-N 结有效地收集,于是,我们关心某处光生载流子对短路电流的贡献与总的光生载流子数之比,将其定义为载流子收集率,用 f_c 表示。由半导体物理相关理论推导,可得:

$$f_c = e^{-x/L_n} \quad (1-4)$$

式中, x 为图 1-7 中太阳电池的坐标轴上任意值; L_n 为电子的扩散长度。

由式(1-4)可看出,半导体太阳电池中光生载流子收集率与离空间电荷区远近有关,距离空间电荷区越远呈现指数衰减越强。由电场引起的载流子漂移速度远大于其扩散速度,故在空间电荷区可认为光生载流子收集率为 1。因为扩散长度 L_n 与载流子寿命 τ_n 有如下关系:

$$L_n^2 = D_n \cdot \tau_n \quad (1-5)$$

式中, D_n 为电子扩散系数。

由此看出,除了空间电荷区以外的区域,扩散长度与少数寿命是决定载流子收集率的关键。载流子收集率与电池空间关系如图 1-8 所示。

(3) 结深与表面复合速率 一般情况下,结深以微米或纳米为单位计量,定义为从太阳电池表面(光照面)到扩散层掺杂浓度等于衬底掺杂浓度处的距离。从太阳电池表面深入半导体材料内部,光谱激发率会按指数衰减。但载流子收集率最高时出

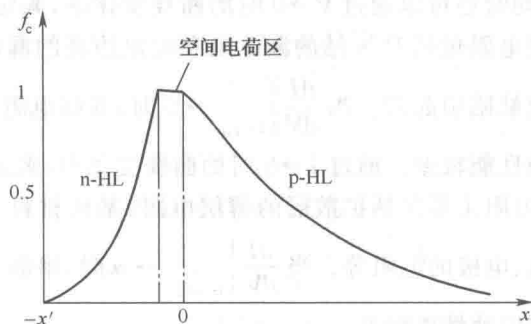


图 1-8 载流子收集率与电池空间关系

现在空间电荷区,若想要尽可能多地收集光生载流子,就需要让空间电荷区尽可能靠近太阳电池表面,也就是说要让结深尽可能小,才能使载流子高激发率区与高收集率区更近,从而获得更多的剩余载流子来提高短路电流。

少数载流子在半导体表面湮灭称之为表面复合。半导体表面是晶格的终止面,存在许多缺陷,还有污染或外界因素的影响,会使缺陷的数量增多,这些大量的缺陷也就成了载流子的产生-复合中心。所以对于少数载流子复合,在半导体表面有很强的复合作用。由于半导体表面与外界接触,半导体表面对外界环境因素很敏感,半导体表面大,将很大程度地影响半导体器件性能。在半导体物理中,我们用表面复合速度来表征表面复合的强弱程度,表面复合速度也可以理解为载流子流出表面的速度。表面复合速度的单位是 cm/s 。对于用反型扩散制成的半导体太阳电池,其表面 N 型半导体浓度比其基区 P 型半导体掺杂浓度高 4 个数量级,表面高掺杂使表面复合速率比太阳电池体内复合速度高出约 8 个数量级。而太阳电池表面还需要做成栅状电极收集电荷,因此我们希望通过表面高掺杂来减小金属栅线与半导体材料的接触电阻,通过扩散进行高掺杂,结深便会加深。于是结深与表面复合便成为高效太阳电池的对立因素。通过优化计算,常见晶体硅半导体太阳电池结深一般为 $200\sim 400\text{nm}$ 。

(4) 顶区横向电阻 顶区横向电阻又称之为表面横向电阻,顶区横向电阻对于半导体太阳电池的电性能输出参数有非常重要的影响。顶区表面一般是金属栅线与 N 型半导体的欧姆接触,当太阳电池接负载工作时,电流在太阳电池内部是垂直于表面流动的,而在顶区的表面需要沿表面横向流动,以达到被栅线收集的目的。太阳电池工作时电流的流动如图 1-9 所示。表面横向电阻、栅线与半导体的接触电阻和栅线本身电阻构成太阳电池串联电阻主要部分。

若相邻两栅线间距为 x ,结深为 d ,栅线长为 l ,由于顶区很薄(仅为太阳电池厚度的 $1/10$),近似认为顶区薄层均匀掺杂,并设电阻率为 ρ_n ,则相邻两栅线间的电阻 R 可表示为:

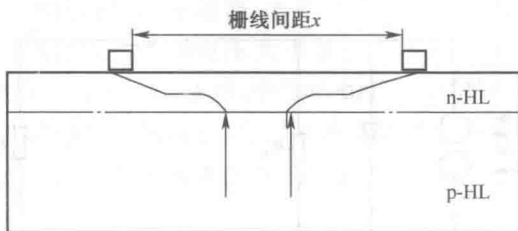


图 1-9 太阳能电池工作时电流的流动

$$R = \rho_n \cdot \frac{x}{ld} \quad (1-6)$$

对于非常薄的顶层,设电子迁移率为 μ_n ,受主杂质浓度为 N_A ,则:

$$\rho_n = \frac{1}{q\mu_n N_A} \quad (1-7)$$

在半导体物理中以单位厚度的电阻率来描述薄层导电情况,称为薄层电阻率或方块电阻,用 Ω/\square 表示,则太阳能电池顶层的方块电阻 R_{\square} 可通过下式计算:

$$R_{\square} = \frac{1}{q\mu_n N_A d} \quad (1-8)$$

横向电阻作为太阳能电池串联电阻的部分,我们希望其值小一些。但由式(1-8)看出迁移率 μ_n 、受主杂质浓度 N_A 与结深 d 是相互制约的,所以需要综合考虑进行最优化处理。同时顶区横向电阻越大,所引起的功率损耗也增大。我们可以采用较宽的栅线、较窄的栅线间距来降低串联电阻,但会带来较大的光损耗。综合这些因素,对于硅材料太阳能电池,方块电阻一般以 $30 \sim 100 \Omega/\square$ 为宜。

六、影响太阳能电池效率的主要因素

(1) 太阳能电池效率的理论计算 太阳能电池效率是太阳能电池最为重要的参数之一。太阳能电池工作时,太阳光照射太阳能电池产生光电流,其电流密度为 J_l ,对太阳能电池 P-N 结产生正偏电压,引起暗电流电流密度 J_d 。在测定太阳能电池面积后,即可以把电流密度转化为电流量,再利用式 1-3 计算出太阳能电池的转换效率。

(2) 串-并联电阻的影响 太阳能电池工作电路图可以等效为图 1-10 所示,在该图中, R_s 为串联电阻,其主要由太阳能电池的体电阻、表面电阻、正面、背面栅线电阻、栅线与硅表面接触电阻等部分组成; R_{sh} 为并联电阻,主要是由于硅片内部缺陷或边缘不清洁而引起的旁漏电阻。一般情况下, R_{sh} 越大越好, R_s 越小越好,在理想情况下, R_{sh} 可以认为无穷大, I_{sh} 可以忽略, R_s 可以等于零。

串联电阻与并联电阻会直接影响太阳能电池的填充因子,串联电阻 R_s 越大、并联电阻越小,填充电流下降越多,填充因子减少越多。

一定的太阳光照射下,太阳能电池产生一定的光生电流,如果太阳能电池体内有区域性高导杂质或者边缘刻蚀不彻底,就会对已产生的光生电流有分流作用,以致过 P-N

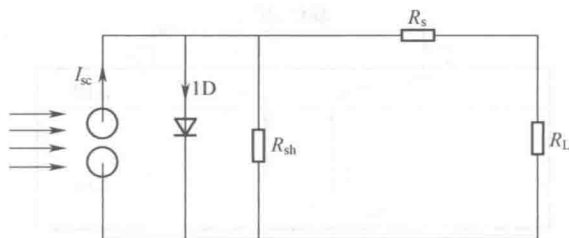


图 1-10 太阳电池等效电路

结势垒有效电流减少。这就相当于外部与 P-N 结并联了一个电阻称之为并联电阻。并联电阻实际上是一个不存在的等效电阻。并联电阻越小,所产生的分流效应就越明显,为了增加光生电流利用率,并联电阻较大为宜。并联电阻作为描述电池特性的基本电学参量已被人们接受。虽然并联电阻不是一个实体电阻,在太阳电池等效电路图中,并联电阻用实体等效电阻表示。对于单结(P-N 结)太阳电池,可以给出一个串联电阻、并联电阻等综合在一起的电路模型,以描述太阳电池等效工作过程。影响太阳电池和组件实际并联电阻的因素非常多,如硅片边缘的短路通道(脏污可以引起)、薄膜沉积质量差,导致薄膜电池中存在针孔形成的短路通道等都会使并联电阻值降低。

实际的测量系统中,我们是将光伏 $I-V$ 特性曲线中接近 $V=0$ 的部分,进行数学拟合,或直接计算 dI/dV 的倒数,实际上就是计算光伏 $I-V$ 特性曲线接近 $V=0$ 的微分的倒数,作为太阳电池并联电阻的测量值。这样处理,对于填充因子较差的太阳电池或组件,可以将串联电阻定性地用于工艺优化和分析;对于填充因子较好的太阳电池或组件,由于测试设备所测电信号的起伏,以及所用数学拟合方法的局限,对于同一片样品,多次测量值都会不一样,所以很多测量系统,一般都不给出并联电阻值。

串联电阻可表示如下:

串联电阻 = 硅片基体电阻 + 扩散方块电阻 + 栅线电阻 + 烧结后的接触电阻

式中,基体电阻由硅片决定;扩散方块电阻伴随着结深的变化是可以调节的;栅线电阻主要靠丝网印刷参数决定,重要的是栅线的清晰度和高宽比越大越好,若单纯地减少串联电阻,栅线要选取电阻率小的材料,且截面面积就要尽可能大,截面面积大了会对太阳电池的遮挡增加;接触电阻主要看烧结。

串联电阻 R_s 影响短路电流, R_s 增大会使短路电流降低,而对开路电压没有影响,并联电阻反映的是太阳电池的漏电水平。漏电电流理论上可以归结到并联电阻上。并联电阻影响太阳电池开路电压, R_{sh} 减小会使开路电压降低,但对短路电流基本没有影响。

因为填充因子 FF 定义为最大输出功率 P_m 与 $I_{sc}V_{oc}$ 的比值,在 $I-V$ 特性曲线上即为最大功率矩形面积 $I_m V_m$ 与 $I_{sc}V_{oc}$ 矩形面积之比。串联电阻越小,并联电阻越大,太阳电池的填充因子就越接近于 1,在太阳电池的 $I-V$ 特性曲线上,曲线就越接

近长方形,说明太阳能电池的转换效率越高,太阳能电池性能就越好。

(3)温度的影响 太阳能电池开路电压大小是由太阳能电池半导体材料的禁带宽度和费米能级共同决定的。由于温度越高,半导体的费米能级就越靠近价带,所以当温度升高时,太阳能电池开路电压有所减小,可以理解为温度与开路电压二者的曲线大概是一个斜率为负值的直线,太阳能组件认证的过程中,被称为检测太阳能组件的电压温度系数。

温度对 $I-V$ 特性曲线的影响如图 1-11 所示,当温度升高时,短路电流有所增大,由 $I-V$ 特性曲线与坐标轴围成的面积变化可以看出,比温度升高对开路电压下降的影响小,说明温度升高对太阳能电池光电转换效率是负面影响。温度-短路电流曲线是斜率略微为正值的直线,在太阳能组件认证的检测中,被称为检测太阳能电池的电流温度系数。

温度对 $P-V$ 特性曲线的影响如图 1-12 所示,当温度升高时,太阳能电池总输出功率呈现下降趋势(V 下降幅度较大,而 I 上升幅度很小,因此 $P=VI$ 下降)。

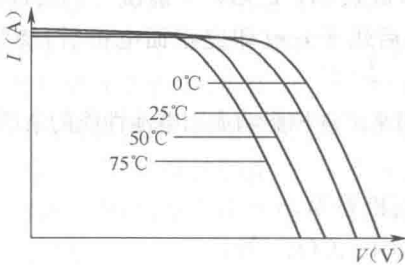


图 1-11 温度对 $I-V$ 特性曲线影响

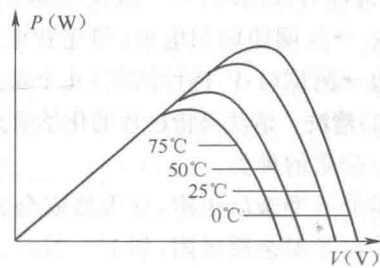


图 1-12 温度对 $P-V$ 特性曲线影响

(4)功率损耗的影响 影响太阳能电池功率损耗的因素非常多,其中带隙不匹配,串、并联电阻,栅线遮挡,减反射膜层是影响太阳能电池功率降低的主要因素。

①带隙不匹配。即光子的能量与太阳能电池禁带宽度 E_g 不匹配引起的损耗。对于一个给定材料的太阳能电池,小于禁带宽度的光子,此部分光子不能激发正负电子对而形成光生载流子,对太阳能电池效率没有贡献,而且还会引起晶格的振动产生热,对太阳能电池产生负面影响。大于禁带宽度的光子能激发光生载流子,但高出禁带宽度的能量将转换成热,也会对太阳能电池产生负面影响。光子能量高出 E_g 的能量越多,损失的太阳光能量比例也就越大。理论上讲能量刚好等于或略大于禁带宽度 E_g 的光子,对太阳能电池发电是最匹配的。

②串、并联电阻引起的损耗。当太阳能电池供负载工作时,由于太阳能电池本身和栅线等部件有一定电阻,所以会损失一部分电功率。

③栅线覆盖和封装玻璃的遮挡影响对光能的吸收。目前,硅太阳能电池受光面载流子收集是靠很细的银栅,这些收集载流子的栅线会覆盖太阳能电池表面 5% 的面积,随之也将失去相应比例的光能。由于太阳能电池一般都很薄,组件封装时一般都会用