

TAIYANGNENG DIANCHI BIAOMIAN FUHE GONGNENG DUMO JISHU

太阳能电池 表面复合功能镀膜技术

王朝勇 李银峰/著



中国原子能出版社

太阳能电池 表面复合功能镀膜技术

王朝勇 李银峰/著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

太阳能电池表面复合功能镀膜技术 / 王朝勇, 李银峰著. -- 北京: 中国原子能出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-5022-9197-6

I. ①太… II. ①王… ②李… III. ①太阳能电池—表面复合—镀膜工艺 IV. ①TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 150457 号

内 容 简 介

本书利用 DMS 和 EFMS 技术制备了 TiO_2 薄膜以及掺杂 Al_2O_3 的 TiO_2 薄膜,研究了其结构、光学特性和光催化性能的变化规律,并以此为基础研制了具有减反射和自清洁功能的薄膜。本书主要内容包括: TiO_2 薄膜的制备及表征仪器、工艺参数对 TiO_2 特性的影响、工艺参数对 TiO_2 薄膜光催化性能的影响、 Al_2O_3 掺杂对 TiO_2 薄膜的影响、减反射自清洁薄膜的制备及性能表征等。本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,是一本值得学习研究的著作。

太阳能电池表面复合功能镀膜技术

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 张 琳

责任校对 冯莲凤

印 刷 三河市铭浩彩色印装有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 11.75

字 数 152 千字

版 次 2019 年 3 月第 1 版 2019 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-9197-6 定 价 48.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

前 言

提高太阳光的入射比例、减少界面表面损失以及使用过程中的维护成本是提高太阳能利用效率的有效途径,通过选择合适的材料在衬底表面制备具有减反射和自清洁性能的复合功能薄膜可实现上述目标,适宜的材料是 TiO_2 。 TiO_2 薄膜的制备方法中,直流磁控溅射(DMS)技术因具有绿色环保、参数调控精确简便、可以低温快速沉积制备多种薄膜以及可重复性强等优点,可方便地制备多种与衬底结合紧密的薄膜。为提高制备薄膜的性能,本书对传统的 DMS 技术进行改进,研制了能量过滤磁控溅射(EFMS)技术,通过控制溅射粒子的能量及入射角度提高成膜质量。本书利用 DMS 和 EFMS 技术制备了 TiO_2 薄膜以及掺杂 Al_2O_3 的 TiO_2 薄膜,研究了其结构、光学特性和光催化性能的变化规律,并以此为基础研制了具有减反射和自清洁功能的薄膜,主要研究内容有:

(1)优化了 TiO_2 薄膜制备参数,发现沉积温度为 $100^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 、沉积压强为 $0.75 \sim 3.0 \text{ Pa}$ 、沉积时间为 $60 \sim 150 \text{ min}$ 、氧氩比为 $1:6 \sim 1:10$ 、溅射功率为 $148 \sim 443 \text{ W}$ 范围内制备的 TiO_2 薄膜都为单一的锐钛矿结构,没有出现其他结构。随着沉积温度的升高、沉积压强的降低、沉积时间的增加、氧氩比的减小和溅射功率的增加,薄膜的结晶性变好,平均晶粒尺寸减小。 300°C 时薄膜的沉积速率最大。沉积压强增加,沉积速率变小。氧氩比越小,沉积速率越大。溅射功率增加,沉积速率变大。

(2)研究了制备参数对 TiO_2 薄膜透射率、折射率、消光系数和光学带隙等光学特性的影响,发现薄膜的平均透射率在制备温度为 300°C 时达到最大,温度降低或者升高透射率都有所降低。沉积压强增加,平均透射率变大。 $60\sim 150\text{ min}$ 沉积时间内,平均透射率在 90 min 最小。氧氩比降低,平均透射率降低。溅射功率增加平均透射率增加。 TiO_2 薄膜的折射率随着沉积温度升高、沉积压强降低、氧氩比增加和溅射功率增加而增加。 $60\sim 150\text{ min}$ 沉积时间内,折射率在 120 min 最大。低折射率锐钛矿 TiO_2 薄膜的优化制备条件为:

沉积温度: 100°C ;压强: 3.0 Pa ;氧氩比: $1:6$;时间: 90 min ;功率: 295 W 。

550 nm 处薄膜的折射率为 2.06 。 TiO_2 薄膜消光系数在大于 400 nm 的波长范围内为零,为透明无吸收薄膜。光学带隙在制备温度为 300°C 时最大,随着沉积压强、沉积时间增加、氧氩比降低和溅射功率增加,薄膜的光学带隙由小变大。 500°C 退火后的 TiO_2 薄膜的结晶性变好,透射率降低,折射率变大,光学带隙变大。

(3)对比研究了 EFMS 与 DMS 技术,研究了 EFMS 技术中过滤电极对薄膜的影响,发现 EFMS 技术制备的 TiO_2 薄膜表面较 DMS 技术平整、均匀,平均晶粒尺寸小,折射率高,光学带隙增加。DMS 技术制备的 TiO_2 薄膜光学带隙为 3.04 eV ,而 EFMS 技术制备的 TiO_2 薄膜光学带隙为 3.22 eV 。随着过滤电极目数的增加,薄膜的结晶性变弱,表面晶粒尺寸变小,沉积速率降低,平均透射率变小,折射率增加,光学带隙增加。

(4)研究了制备参数对 TiO_2 薄膜光催化性能的影响,找到最佳光催化性能的制备条件,分析了光催化反应机理。发现参数为 100°C 、 3.0 Pa 、 90 min 、 $1:6$ 和 295 W 制备的 TiO_2 薄膜具有最好的光催化活性,对 RhB 的光催化降解速率为 -0.0034 min^{-1} 。EFMS 技术中用 60 目和 120 目电极制备的 TiO_2 薄膜的光催化

降解速率增加,分别为 -0.00493 min^{-1} 、 -0.00486 min^{-1} ,目数继续增加, TiO_2 薄膜的光催化性能降低。

(5)研究了掺杂不同比例的 Al_2O_3 对 TiO_2 薄膜的结构、光学特性和光催化性能的影响,发现掺杂后薄膜的结晶性变差,沉积速率增加,折射率降低,光催化活性有所降低,分析了机理及原因。

(6)利用DMS和EFMS技术制备了折射率梯度变化的 TiO_2 薄膜。结合表层 TiO_2 薄膜的折射率和光催化性能,确定表层薄膜的制备条件为 100°C 、 3.0 Pa 、 $1:6$ 和 295 W 。根据光学设计原理计算出底层高折射率 TiO_2 薄膜需满足的条件,选择过滤电极为460目的EFMS技术制备底层薄膜,将各层材料的折射率输入TFC膜系设计软件,设计出满足要求的减反射薄膜。根据设计结果制备了单质 TiO_2 单层、双层减反射薄膜,掺杂 Al_2O_3 的 TiO_2 单层、双层减反射薄膜,表征并分析了薄膜的减反射及自清洁特性。结果表明双层减反射薄膜的减反射和自清洁特性均优于单层薄膜,同质 TiO_2 双层减反射薄膜在 $400\sim 800\text{ nm}$ 的平均透射率为 89.1% ,降解速率为 -0.00337 min^{-1} ,氙灯光照 30 min 后接触角为 8° ,表层为掺杂 Al_2O_3 的 TiO_2 薄膜的双层减反射薄膜的平均透射率为 85.4% ,降解速率为 $-0.000496\text{ min}^{-1}$,光照 30 min 后接触角为 29.5° 。太阳能电池表面的应用表明,同质 TiO_2 双层减反射薄膜对电池效率的影响最小,具备较好的光催化活性。

全书由王朝勇,李银峰撰写。由于作者水平有限,错误与缺点在所难免,热忱欢迎各位专家、学者批评指正。

作者

2018年1月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 减反射薄膜的原理及其应用	1
1.2 自清洁薄膜的原理及应用	15
1.3 TiO_2 的特性及研究现状	20
1.4 TiO_2 薄膜的制备方法	24
1.5 本书的研究内容及选题意义	27
第 2 章 TiO_2 薄膜的制备及表征仪器	30
2.1 直流磁控溅射及能量过滤直流磁控溅射设备	30
2.2 TiO_2 薄膜的制备	35
2.3 薄膜的表征方法及仪器	36
2.4 光学特性测试	38
2.5 光催化试验	42
2.6 光学设计软件	44
2.7 测试仪器	45
第 3 章 工艺参数对 TiO_2 特性的影响	46
3.1 直流磁控溅射工艺参数对 TiO_2 薄膜的影响	46
3.2 能量过滤磁控溅射技术	85
3.3 退火对 TiO_2 薄膜的影响	94
3.4 本章小结	99
第 4 章 工艺参数对 TiO_2 薄膜光催化性能的影响	100
4.1 DMS 工艺参数对 TiO_2 薄膜的光催化性能的影响 ..	102
4.2 EFMS 技术对 TiO_2 薄膜光催化性能的影响	117

4.3	退火对 TiO_2 薄膜的光催化性能的影响	120
4.4	本章小结	122
第5章	Al_2O_3 掺杂对 TiO_2 薄膜的影响	123
5.1	掺杂比例对 TiO_2 薄膜的影响	124
5.2	掺杂比例对 TiO_2 薄膜的光催化性能的影响	129
5.3	本章小结	131
第6章	减反射自清洁薄膜的制备及性能表征	132
6.1	单层减反射自清洁薄膜	132
6.2	双层减反射自清洁薄膜	139
6.3	减反射薄膜对太阳能电池效率的影响	146
6.4	本章小结	148
第7章	结 论	149
参考文献		153

第 1 章 绪 论

1.1 减反射薄膜的原理及其应用

1.1.1 引 言

近年来,随着现代科学技术的发展和人们对生活质量要求的提高,对能源的需求进一步增加,能源在社会经济、科技以及军事的发展中的作用至关重要。从能源的利用技术角度划分,可分为传统能源和新能源两种形式,传统能源包括石油、煤和天然气等长期以来已被人类大量使用的化石能源,具有较高的工业化程度,长期以来在能源消耗中占据很大的比重。新能源是指随着社会和科技的发展而处于研究和开发利用的能源,诸如太阳能、核能、风能和潮汐能等。相对于传统能源,新能源的开发和利用技术手段还不甚成熟,利用程度和效率受到制约。英国石油公司(BP)2014年6月发布的世界能源统计年鉴显示^[1],在2013年世界能源消费结构中,传统的化石燃料仍为消耗主体,其中煤、石油和天然气占据能源消耗市场份额的86.7%,新能源占据13.3%。相对于2012年的能源消费结构,化石燃料的主体地位没变,但是所占的比重略有下降(2012年为87%),实现了连续13年的下降趋势。可再生能源所占的比重增长了0.2%。化石燃料的消耗结

构中,煤的市场份额增长为近几年最大(30.1%),跃为 1988 年以来的最高水平,石油所占的份额连续降为 32.9%,达到 26 年来最低。图 1-1 为 2013 年全球能源消费量的对比图。

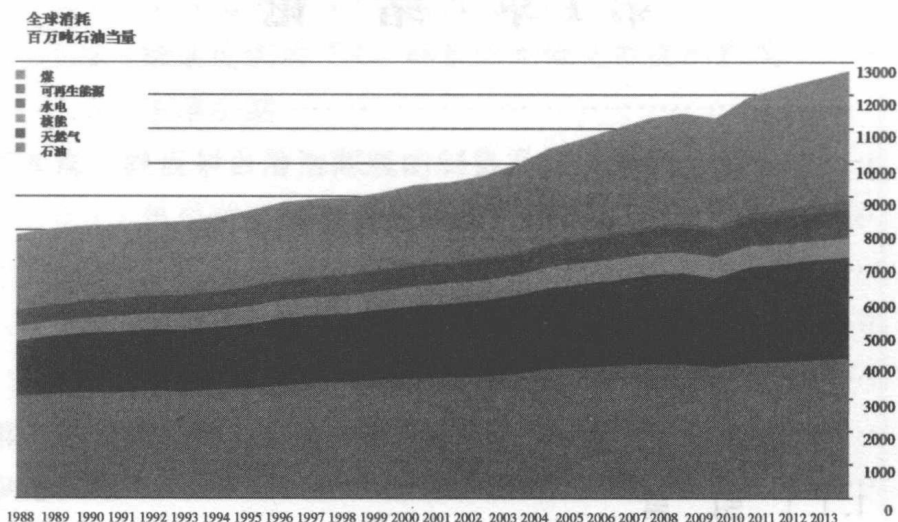


图 1-1 全球一次能源消费结构图^[1]

传统能源的使用存在不可避免的弊端。首先传统能源分布不均,随着资源的短缺以及各国社会经济发展对能源的依赖,势必会造成能源价格的上涨,从而引发一系列经济甚至政治上的冲突。近年来发生的战争摩擦究其原因就是各国对能源的觊觎。图 1-2 为世界能源分布以及碳排放量的情况分布图^[1],可以明显看出各种能源在世界各国分布的区域相当不均匀,截至 2013 年底,全球煤探明储存量为 891331 百万吨,年消耗量为 5579 百万吨,按照此消耗量,储存量仅能满足 160 年人类发展的需求。石油储量为 16880 万亿桶,日消耗 9133 万桶,目前储备量仅能维持 50.6 年。天然气储备量为 187.3 万亿立方米,2013 年消耗量为 3.3 万亿立方米,仅能维持 60 年的供给量。其次在化石能源的使用过程中造成环境污染和温室效应,据统计,2013 年全球碳排放量达到 360 亿吨,其中大部分是化石燃料使用的排放,比较严重的环境问题已经在全球呈现出来。

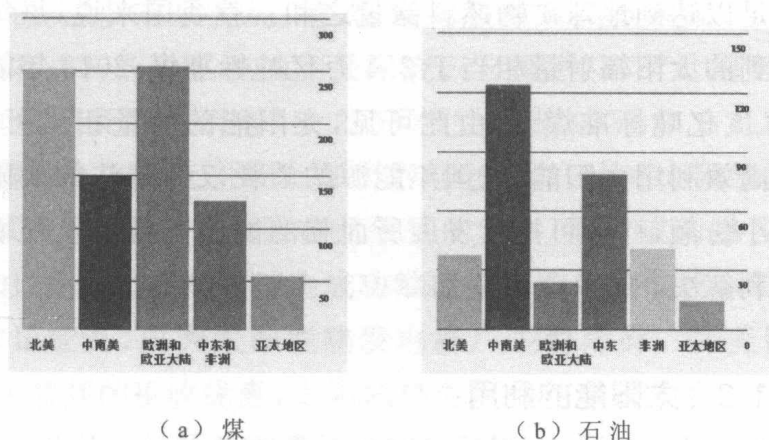


图 1-2 2013 年世界一次能源分布区域储量/产量比^[1]

随着化石燃料的日益枯竭及其不可再生性,发展经济的成本随之增加,伴随而来的环境问题也会影响人类生存环境和可持续发展的要求,对新能源的探索 and 开发利用已经刻不容缓。目前正在使用的新的洁净能源主要有核能、水电和可再生能源,2013 年它们分别占能源消耗结构的 3.9%,6.2%和 2.2%,较之 2012 年有了不同程度的增长,其中核能增长 0.9%,水电增长 2.9%,可再生能源增长 16.3%。这表明全球对能源问题的重视程度已普遍提高,而且新能源的开发和利用程度都有提升。世界各国能源战略发展的结构和目标都已进行了调整,对新能源的开发和利用的投入加重,能源的消费结构中已逐渐增加清洁和可再生能源的份额。随着科技和社会的发展,世界能源消费体系应该会逐渐转变为新能源为主导,化石能源为辅助的结构。清洁的核能利用技术比较成熟,但是原材料铀的储量有限。风能和水能利用总量有限,而且在全球分布不均,开发利用受地理位置和环境的制约。太阳能作为一种清洁无污染的绿色能源,无论是可利用的总量还是分布,都属于可开发利用的优质新能源。太阳能是太阳以电磁波的形式向外辐射的能量,在日地平均距离处的平均太阳辐射强度为 1366 W/m^2 ,也称为太阳常数,到达地球大气表面的总能量可达 174 万亿瓦,去除大气反射和吸收的 53%,到达地球表面的总能量为 82 万亿瓦。数据表明,两周到达地球表面的太阳能辐

射总量足以达到地球矿物燃料储量之和。就我国来说,每年地表所接收到的太阳辐射量相当于 2.4 亿吨标准煤,2013 年能源消耗折 37.5 亿吨标准煤^[2],由此可见,太阳能的数量相当可观,如能充分高效利用太阳能,我国年能源的消耗仅为清洁的太阳能数量中很小份额,社会可持续发展所面临的能源问题以及环境问题都将顺利解决。

1.1.2 太阳能的利用

太阳能的利用方式主要有三种:光热方式、光化学方式和光电方式。光热方式是直接将太阳能转换为热能,通过储热材料以热传导方式将热能输送至需要的地方,包括主动式和被动式,是比较传统而且简单的太阳能利用方式。我国在公元前 11 世纪的西周时期就已经出现“阳燧取火”的技术,是最原始的太阳能利用手段。国外第一次主动把太阳能转化为机械能的记载是法国工程师在 1615 年发明的第一台利用太阳能抽水机^[3],由此开启了人类利用太阳能的新纪元。目前光热转换利用的技术相对比较成熟,设备简单,已存在的太阳能光热装置主要有太阳能热水器、太阳能干燥器、太阳能空调、太阳灶和太阳能温室等^[4],尤其是太阳能热水器和太阳灶的使用,在很大程度上减少了化石能源的使用以及温室气体排放。据不完全统计,截至 2013 年,我国已有的太阳能热水器安装面积已超过一亿平方米,太阳灶 21 万台。光化学方式是将光能转换为化学能,再通过相关化学反应转换为其他形式的能量,主要包括植物的光合作用和存储太阳能的光化学反应,台湾中兴大学和交通大学已经发明人工叶绿素——porphyrin^[5],大大提高了燃料电池的效率。光电转换是直接或者间接将太阳能转换为电能,是太阳能最重要的应用之一,有两种发电方式:第一种是先将太阳能转化为热能,通过聚焦方式将太阳能集中起来,利用产生的蒸汽驱动器械装置发电,根据聚集反射

太阳光的类型,有聚光类、槽式、塔式和蝶式热电系统^[6-9],世界各国都在进行热电系统的相关研究。自国家“863”计划“太阳能热发电技术及系统示范”于2006年立项至2012年8月成功发电,我国首个也是亚洲最大塔式热电电站(八达岭太阳能热发电站)正式发电,填补了我国在此领域的空白,同时成为继西班牙、美国和以色列之后的第四个成功掌握太阳能热发电技术的国家,但成本比较高,成为太阳能热发电推广主要障碍。在美国西南部,除去联邦的税收优惠,太阳能热电厂出厂电价约合每度13~17美分,此外由于需要数量较多的反射镜,占用较多的土地面积,热电厂选址受到一定程度的制约。

第二种是直接将太阳能转换为电能,利用PN结的光生伏特效应,将太阳能转换为电能。自1839年法国科学家埃德蒙·贝克勒尔(Edmund Becquerel)发现电解液中的电极上涂有CuO或AgX发生光伏效应并成功研制了世界上第一个简单的光伏器件以来^[10],光伏效应实验和应用的研究在国内外广泛展开。爱因斯坦于1904年发表了光电效应的论文,为光伏效应理论的建立奠定了基础。1954年,美国贝尔实验室的D. M. Chapin等研制了第一个实用单晶硅太阳能电池(效率为4.5%)^[11],开启了光伏技术研发利用的新篇章。随着新材料的出现和半导体加工工艺的发展,到目前为止太阳能电池的发展经历了三代^[12,13]。第一代太阳能电池是晶体硅太阳能电池^[14,15],包括单晶硅和多晶硅,由于转换效率高,产业化光电转换效率已经超15%,原材料制备及电池组装工艺日趋成熟,投资风险比较小,目前仍占据市场的主流。其结构如图1-3所示,电池组件的核心部分为电池板,经过正面焊接、背面焊接、组件层压、修边和最后封装流程完成组件。目前单晶硅太阳能电池实验室和工业生产中的转换效率最高,实验室的转换效率接近30%,康斯坦兹国际太阳能研究中心(ISC Konstanz)与意大利的Silfab公司报道了交错背接触(IBC)太阳能电池效率高达21%,已成功达到商用尺寸要求。

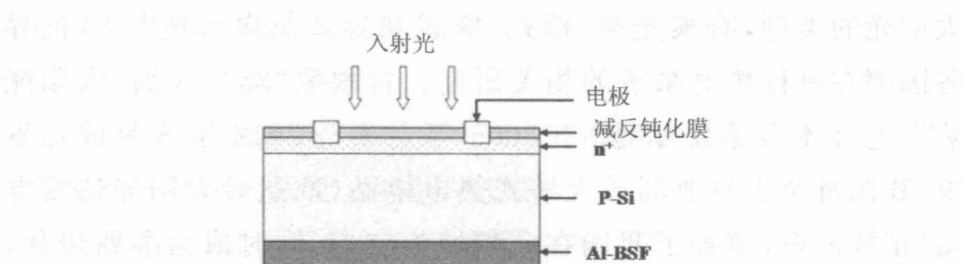


图 1-3 晶体硅太阳能电池组件结构示意图

由于单晶硅太阳能电池对原材料 Si 要求严格,导致太阳能发电成本增加。多晶硅太阳能电池利用多晶硅,由于多晶硅中存在的杂质和缺陷成为光生电子空穴的复合中心,电池的效率降为 16% 左右,但其对材料的要求有所降低,发电成本下降,电池片的形状也可以加工为长方形,组件的利用率高,因此也有一定的市场空间。

第二代太阳能电池为薄膜太阳能电池^[16,17],第一代电池的高转换效率需要保证足够的厚度,电池成本增加,薄膜太阳能电池就是为避免这个弊端而研发的。在不锈钢、玻璃或者塑料衬底上沉积太阳能转换材料,可以方便实现大面积生产,降低生产成本。已商业化的电池主要有非晶硅薄膜电池、多晶硅薄膜电池、碲化镉(CdTe)电池、铜铟镓硒(CIGS)薄膜电池和砷化镓(GaAs)薄膜电池^[18-20]。其中非晶硅薄膜太阳能电池制作工艺简单,硅消耗数量小,成本较低,缺点在于因禁带宽度较大(1.8 eV)而造成光谱响应仅限于可见光部分,光电转换效率低,因光致衰减效应明显而稳定性差。CIGS 是在 CIS 薄膜电池中掺杂 Ga 替代部分 In,形成可调带隙(1.04~1.68 eV)的 CIGS 四元结构,非常适合作为太阳能电池转换材料。2007 年,美国可再生能源实验室(NREL)制备了 CIGS 薄膜太阳能电池,转化效率达到 19.9%,业界纪录高达 17%。CIGS 电池具有转换效率高,电流稳定,太阳光谱响应宽,吸收系数高,材料来源广泛,生产成本低及回收周期短,无光衰,污染小等优点,成为太阳能电池研究的热点。但由于是多元晶格、多层界面结构,制作过程复杂,对原子比例要求严格,对设

备的稳定性和精度要求严格。CdTe 的禁带宽度(1.5 eV)与太阳光谱吻合,极适合做光电转换材料,CdTe 电池的转换效率高(理论效率为 28%),性能稳定,成本相对较低,工艺简单,成为薄膜太阳能电池中发展较快的电池。2014 年 2 月,美国 First Solar 公司制造了转换效率为 20.4%的小面积电池,到 3 月份,其全面积组件的效率为 17.0%。CdTe 电池的主要缺点在于稀有金属 Te 的储量有限,能否满足日益增加的电池需求尚不确定;重金属 Cd 会带来环境和安全问题,尽管美国、德国研究表明,成功的回收技术可以高效地回收利用报废和损毁电池组件,使电池在使用中和报废后对环境友好,但是也制约了 CdTe 电池的发展。

第三代太阳能电池是新型太阳能电池结构^[21,22],目的是提高转换效率、完善性能、简化生产工艺流程以及降低成本。第三代电池取长补短,既有前两代电池的高效、工艺简单和性能稳定的优点,又克服了高成本、原材料不足且有毒的缺点。主要有叠层电池、热载流子电池、热光伏电池(TPV)、上下转换电池及量子点电池等^[23-27],其中叠层电池是研发的重要分支。叠层电池是将不同带隙的材料按照一定的顺序通过机械堆叠或者单片组装的方法制备,2011 年 N. Lo'pez 报道了用镓氮砷(GaNAs)合金多带隙半导体制备的多带隙太阳能电池,效率超过 40%^[28]。目前研究较多的是 GaAs 叠层电池,德国的 Azurspace 公司已具备批量生产单片式 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池的能力,转换效率最高可达 30%。

自 1992 年 9 月在巴西里约热内卢召开联合国环境与发展会议之后,世界各国都意识到温室效应带来的环境问题日益严重,加大力度开展了太阳能清洁能源的开发和利用的研究。我国对太阳能利用研发的投入力度逐年增大,2016 年 12 月份印发的《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》中明确提出新能源产业的战略规划,从数量上和质量上规划了太阳能的发展线路图,明确要求“到 2020 年,太阳能发电装机规模达到 1.1 亿千瓦以

上,力争实现用户侧平价上网。其中,分布式光伏发电、光伏电站、光热发电装机规模分别达到 6000 万千瓦、4500 万千瓦、500 万千瓦。”这个目标的实现依赖于太阳能电池组件应用中一系列问题的解决,最重要的核心问题在于电池的转换效率的提高以及发电成本的降低。

图 1-4 为太阳能电池结构图,根据太阳能发电原理及过程,电池的转换效率取决于表面入射量、转换材料吸收率、背面电极反射以及透射率,提高太阳能电池效率可从对应的部分着手。

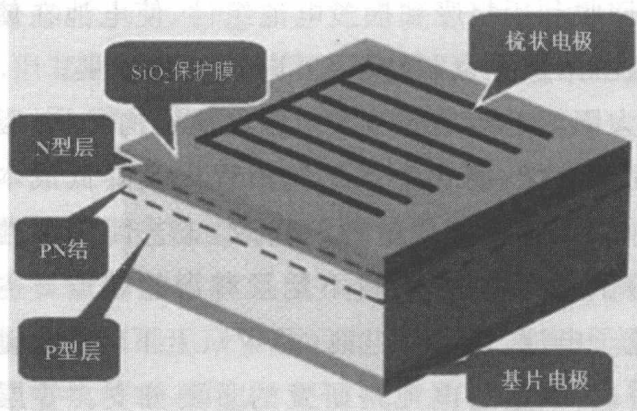


图 1-4 太阳能电池结构示意图

因电池材料折射率和介质折射率不同而在太阳能电池表面引起的反射损失占入射太阳能较大的比例,单晶硅的折射率较高,表面反射率可达 30%,这不利于太阳能的高效利用。减少太阳能在电池表面的反射可通过设计陷光结构实现,硅太阳能电池一般通过制绒工艺在表面形成金字塔形陷光结构^[29],通过增加光在表面的反射次数减少表面散失。单晶硅电池表面主要用 NaOH 溶液进行腐蚀,利用(111)和(100)晶面不同的腐蚀速率形成金字塔结构,该技术工艺已经成熟并成功用于单晶硅表面,但随着入射角的变化,反射率变化较大^[30-32]。不同太阳能电池材料的表面制绒工艺及复杂程度不同,B. C. Chen 等报道了采用印刷技术在聚合物太阳能电池表面制备纳米结构,电池的效率提高了 43%^[33]。L. S. Bai 等采用直流脉冲激光干涉织构方法在 α -

Si:H/ μ c-Si:H 串联电池表面制备了 ZnO:Al 衍射光栅,电池的方块电阻增加,效率增加至 10%^[34]。提高太阳能传播过程中的吸收可增加入射光在介质中的传播路径,即增加电池的厚度,这与降低发电成本的目标相悖。叠层太阳能电池通过组合不同带隙的材料增加对不同波段太阳光的吸收提高了电池效率,在一定程度上解决了这一问题。为减少入射光线在电池底部的透射损失,一般在电池背面制备背反射镜,即在背面采用制绒结构,结合金属电极的反射使入射光在介质中的光程增加,产生的背电场同时能够抑制电子向背面的扩散而减少在电池背面的复合。新型电池结构的出现对被反射镜的要求提高,目前主要有氧化物/金属结构,如 Ag/ZnO、Ag/Al 等结构已在太阳能电池中得到了应用^[35,36]。具有衍射结构的超晶格布拉格反射镜从理论上来说兼具有较好的背面散射和反射,可以增加光线在介质材料中的光程。L. Zhao 等报道了 ITO 衍射光栅结合 α -Si:H/ITO 超晶格布拉格反射镜和 Ag 反射层,采用严格耦合波分析法分析结构的可行性,实验结果表明此结构的太阳光吸收系数可达 68%^[37],但制作相当复杂,对工艺要求严格。

从太阳能电池产业化角度分析,提高太阳能电池效率的方式主要有提纯转换材料、研发新的太阳能转换材料及结构和完善电池的封装技术及优化组建安装工艺等技术手段,现有的技术条件下进展有限,而且突破的空间不大。为在室外空间中保护太阳能转换材料,太阳能电池组件的应用需要安装玻璃盖板,玻璃盖板减少了入射到电池材料表面的太阳能,降低了转换效率。目前封装太阳能电池采用超白压花玻璃(光伏玻璃)^[38],是通过特殊工艺制备的超透明低铁玻璃,透射率可达 92%,仍有一部分太阳能损失。为减少封装玻璃的反射损失,国内外科研工作者一直致力于提高光伏玻璃透射率的研究。光伏玻璃的成本是普通玻璃的两倍左右,因此为降低太阳能电池成本,在光伏玻璃甚至普通玻璃上制备减反射薄膜,利用光的相干性增加透射率,提高太阳能电