

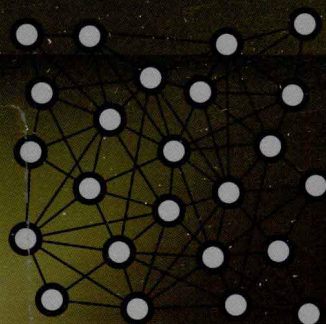


国家科学技术学术著作出版基金资助出版

纳米材料与 太阳能利用

NAMI CAILIAO YU
TAIYANGNENG LIYONG

沈辉 刘勇 徐雪青 编著



NAMI CAILIAO YU
TAIYANGNENG LIYONG



化学工业出版社



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

纳米材料与 太阳能利用

NAMI CAILIAO YU
TAIYANGNENG LIYONG

沈辉 刘勇 徐雪青 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

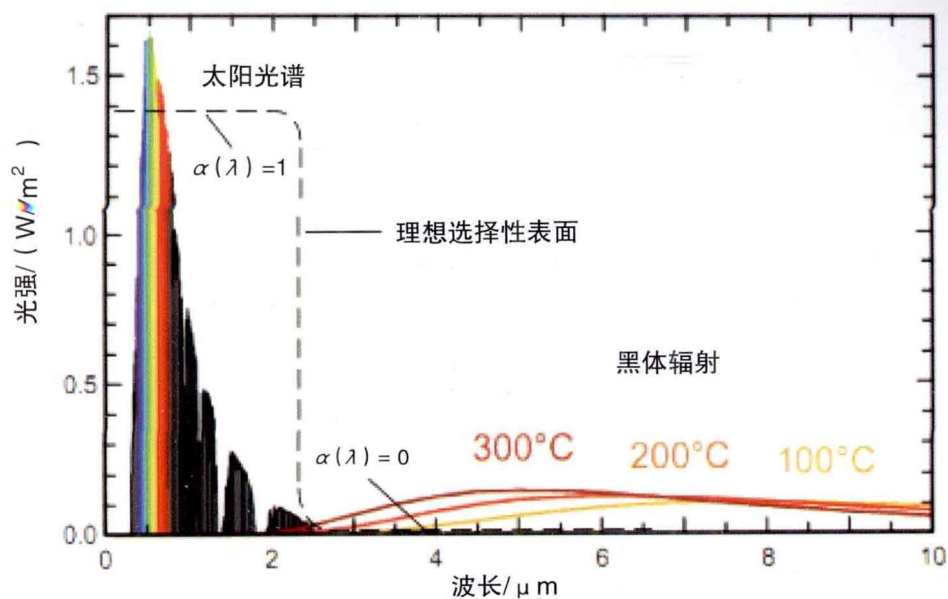


图2-1 到达地面的太阳辐射及100℃、200℃及300℃的黑体辐射能量分布^[17]



图2-14 蓝膜太阳能吸热板芯

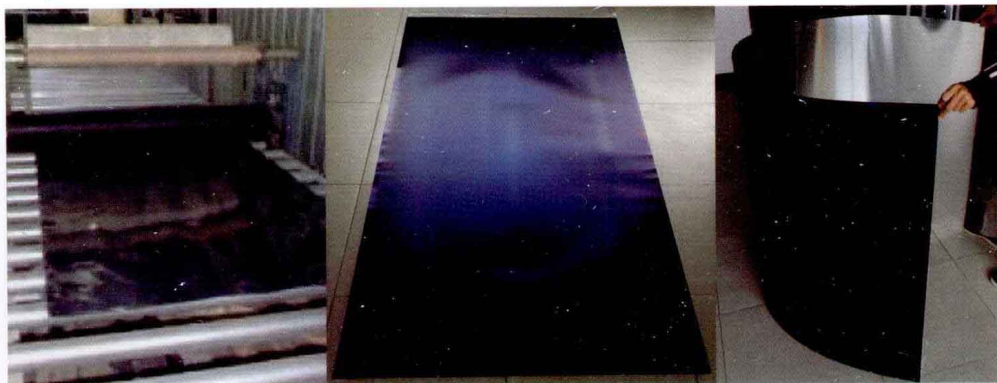


图2-19 广州粤海真空技术公司生产的Ni-Cr系选择性吸收膜

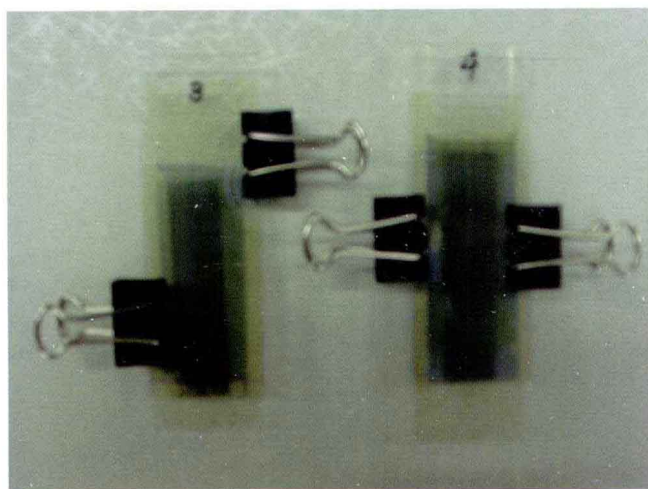
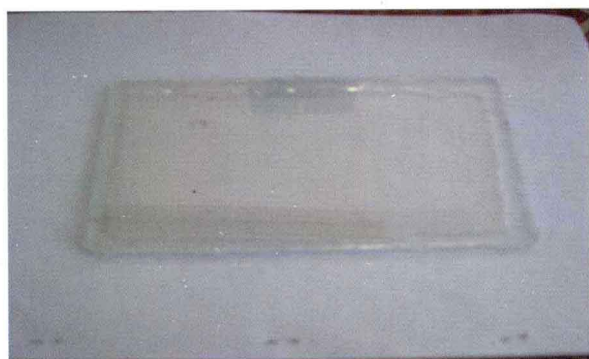


图3-19 器件着色效果图片

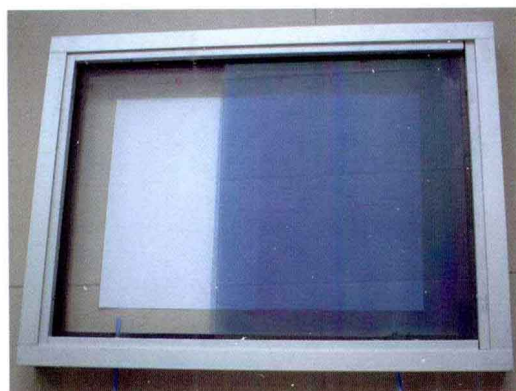


(a)褪色态器件



(b)着色态器件

图3-24 褪色态与着色态气致变色器件



(a)半膜气致变色器件



(b)带字型图案气致变色器件

图3-26 大面积薄膜的变色效果图^[7]



图4-15 减反射薄膜的效果照片

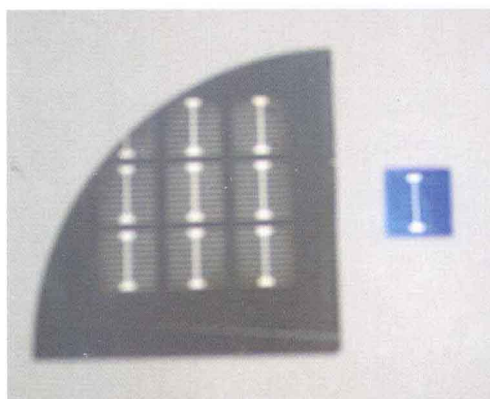


图4-24 裸电池（左）和镀膜电池（右）

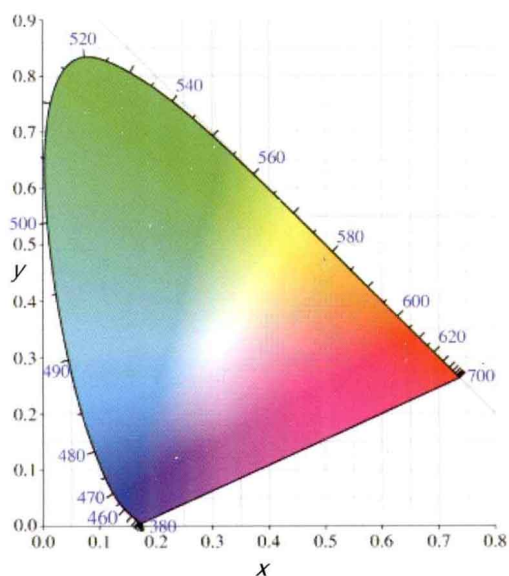


图4-36 CIE色度图^[62]

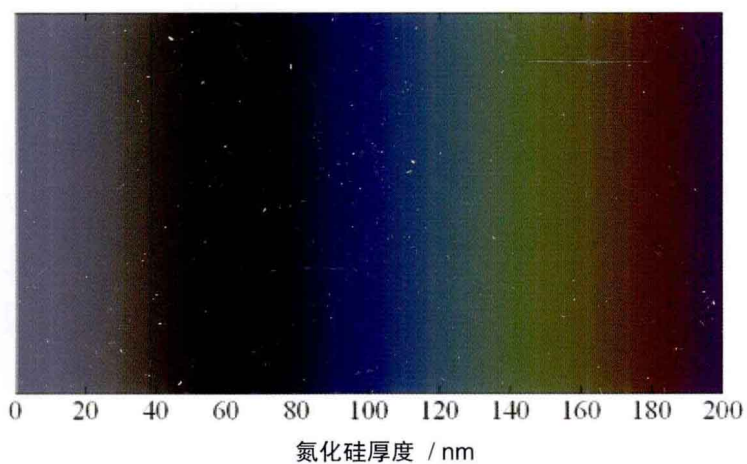


图4-37 单晶硅太阳能电池颜色与氮化硅厚度的关系



图4-38 沉积不同厚度的氮化硅获得的颜色

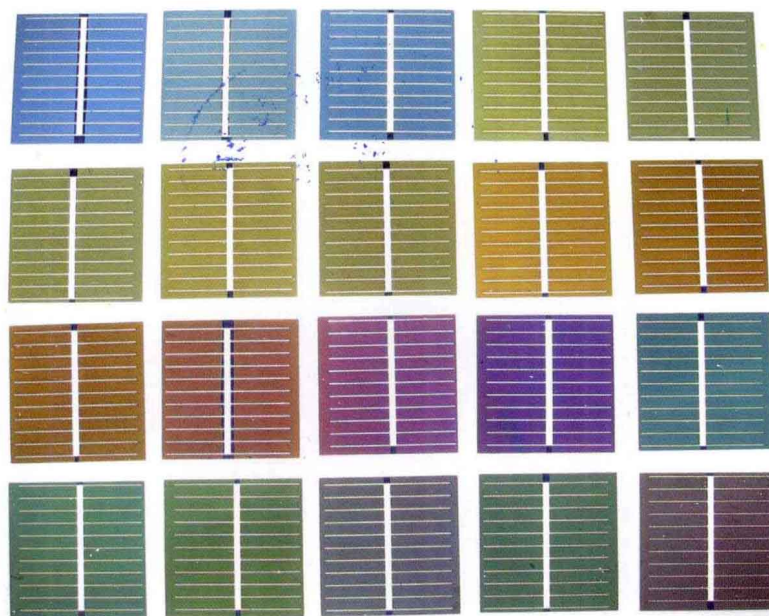


图4-40 彩色电池实物图

前 言



本书紧密联系当前能源和材料两个产业的前沿和热点问题，并将两者有机结合，系统地阐述了纳米材料在太阳能中的应用与发展。本书内容包括各种纳米材料（包括纳米薄膜、纳米颗粒、纳米线等）的制备技术及表征手段，同时，与一般纳米材料专业书籍的不同之处是本书侧重于介绍各种纳米材料在太阳能技术中的具体应用，如光谱选择性吸收涂层、减反射薄膜、太阳光谱调控薄膜及致变色器件、染料敏化太阳电池、量子点太阳电池及新概念太阳电池等，几乎涵盖了纳米材料在太阳能利用的各个方面，内容取材丰富，而且具有广度和深度，对于有志于开拓纳米材料与太阳能利用结合与发展的科研与技术人员具有很好的学术参考价值。

全书由沈辉博士策划、组织并统稿，结合编著者沈辉博士从1997年回国至今十多年科研工作总结和所指导的数十位研究生的论文工作及国内外相关文献，对纳米材料在太阳能技术利用中的工艺、结构、性能及发展前景给予比较系统、详细的描述。全书共分7章，第1章是绪论，主要介绍了纳米材料与太阳能技术各自的学科特点和结合概况。第2章介绍了光谱选择性吸收薄膜的性能和应用，主要涉及博士研究生汪保卫早年的硕士论文工作。第3章结合徐雪青博士、庄琳博士等学位论文工作，主要介绍了气致变色、电致变色、光电致变色等光谱调控纳米薄膜的应用。第4章围绕纳米技术在玻璃和太阳电池上制备减反射薄膜上的应用，系统描述如何利用各种纳米薄膜实现光能的最大利用。此外，也结合了张雪娜硕士、陈明洁硕士（现为在职博士）和王贺权博士等的论文工作。第5章介绍染料敏化太阳电池，重点介绍刘勇博士的研究工作，如纳米线、纳米管在染料敏化太阳电池和立体吸光太阳电池上的应用。第6章简要介绍纳米硅薄膜太阳电池的发展现状，由林杨欢硕士、陈奕峰博士研究生参与编写。第7章介绍等离子体与量子点太阳电池发展的最新动态，主要由段春燕博士、陈奕峰博士研究生和徐雪青博士参与编写，同时许红梅硕士对全书的整理编排做了大量的工作。本书在编写过程中还得到许多同事和学生的大力协助，在此一并感谢。

本书内容丰富，图文并茂，学术性与实用性并举。可供高等院校、科研机构及企业等从事纳米材料与太阳能应用的教学与研发人员参考。由于时间和水平有限，书稿仍有较多的不尽如人意的地方，恳请读者对本书提出批评和建议，以备再版时修改。

著者

2012 年 3 月于广州中山大学

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 纳米材料的概念、发展与分类	2
1.3 纳米材料在太阳电池中的应用	5
1.3.1 硅纳米线太阳电池	5
1.3.2 表面钝化纳米技术在高效晶体硅电池上的应用	5
1.3.3 光谱转换纳米薄膜在太阳电池上的应用	6
1.3.4 表面等离子体激元共振在太阳电池上的应用	7
1.3.5 纳米材料与新型太阳电池	8
参考文献	9
第 2 章 太阳光谱选择性吸收薄膜	13
2.1 太阳光谱选择性吸收薄膜的发展历史	13
2.2 光谱选择性吸收薄膜基本原理	14
2.3 选择性吸收薄膜的研究进展	18
2.3.1 金属陶瓷结构光谱选择性吸收薄膜的膜系设计	18
2.3.2 选择性吸收薄膜材料的选择及制备	22
2.4 磁控溅射制备选择性吸收薄膜	23
2.4.1 磁控溅射制备技术	23
2.4.2 磁控溅射制备 Ni-Cr 系选择性吸收薄膜	29
2.4.3 磁控溅射制备 TiN_xO_y 系选择性吸收薄膜	36
参考文献	39
第 3 章 太阳光谱调控致变色材料	44
3.1 电致变色材料及器件	45
3.1.1 电致变色材料的发展历史	45
3.1.2 电致变色薄膜的应用领域	45
3.1.3 电致变色器件的结构和工作原理	47

3.1.4	电致变色材料的分类、特性和制备方法	48
3.1.5	电致变色智能窗的研究现状和应用前景	54
3.2	纳米光电致变色材料机理及器件	55
3.2.1	光电致变色器件的结构、工作原理和研究进展	55
3.2.2	光电致变色器件的制备工艺研究	57
3.2.3	太阳能自供电电致变色智能窗	63
3.3	气致变色器件	65
3.3.1	气致变色器件的结构	66
3.3.2	气致变色材料变色机理	66
3.3.3	气致变色器件及性能	67
	参考文献	69

第4章 减反膜在太阳能中的应用 71

4.1	减反膜的历史背景	71
4.2	减反膜的原理	72
4.3	减反膜的应用	76
4.3.1	减反膜在太阳能集热器上的应用	76
4.3.2	减反膜在太阳电池上的应用	76
4.4	SiO ₂ 减反膜	77
4.4.1	溶胶-凝胶制备纳米多孔 SiO ₂ 减反射薄膜工艺	77
4.4.2	Sol-Gel 的工艺参数对薄膜表面形貌的影响	78
4.4.3	SiO ₂ 溶胶的红外光谱研究	80
4.4.4	溶胶-凝胶法制备减反射薄膜的性能	82
4.4.5	减反射薄膜的效果照片	85
4.5	TiO ₂ 减反膜	86
4.5.1	TiO ₂ 减反射薄膜的制备	86
4.5.2	温度对直流反应磁控溅射制备 TiO ₂ 薄膜的光学性质的影响	86
4.5.3	双层减反射膜的性能	90
4.5.4	镀减反射膜的太阳电池的性能	91
4.6	SiN 减反膜	91
4.6.1	SiN 薄膜的发展历史	92
4.6.2	SiN 薄膜的研究现状	92
4.7	晶体硅彩色太阳电池	98
4.8	减反射膜的应用前景	102
	参考文献	103

第5章 染料敏化纳米晶太阳能电池 106

5.1 染料敏化纳米晶太阳能电池的发展历史	106
5.2 染料敏化纳米晶太阳能电池的结构和工作原理	107
5.2.1 染料敏化纳米晶太阳能电池的结构	107
5.2.2 染料敏化纳米晶太阳能电池的工作原理	108
5.2.3 染料敏化纳米晶太阳能电池的等效电路模型	109
5.3 染料敏化纳米晶太阳能电池的材料与研究进展	110
5.3.1 纳米晶 TiO_2 多孔薄膜	110
5.3.2 衬底	113
5.3.3 敏化染料	115
5.3.4 电解液	117
5.3.5 对电极	118
5.3.6 密封剂	119
5.4 固态染料敏化纳米晶太阳能电池	119
5.5 传统纳米晶染料敏化太阳能电池制备工艺	120
5.5.1 二氧化钛浆料的制备	120
5.5.2 光阳极的制备	121
5.5.3 电池的封装	121
5.6 全金属钛基底染料敏化太阳能电池	123
5.6.1 纳米晶全金属钛基底染料敏化太阳能电池	124
5.6.2 一维纳米材料制备全金属染料敏化太阳能电池	127
5.6.3 高密度微孔阵列电极制备柔性染料敏化太阳能电池	132
5.7 纳米晶立体吸光太阳能电池	134
5.7.1 纳米晶立体吸光太阳能电池	134
5.7.2 纳米管基微型立体吸光太阳能电池	143
5.7.3 立体吸光太阳能电池的组件性能研究	146
5.8 染料敏化纳米晶太阳能电池的产业化前景	151
参考文献	153

第6章 硅基薄膜太阳能电池 157

6.1 硅基薄膜太阳能电池发展历史	158
6.2 硅基薄膜电池的基本原理	158
6.2.1 非晶硅薄膜的结构及掺杂特性	158
6.2.2 微晶硅薄膜的结构及掺杂特性	159
6.2.3 硅薄膜的光学特性	160
6.2.4 硅基薄膜电池的结构及工作原理	161

6.3 硅基薄膜电池组件的制备方法	163
6.4 硅基薄膜电池的发展现状	164
6.4.1 硅薄膜	164
6.4.2 TCO	165
6.4.3 衬底	166
6.4.4 陷光结构	166
6.4.5 材料表征和理论模型	166
6.5 硅基薄膜太阳电池的产业现状	168
参考文献	169

第7章 等离子体和量子点太阳电池

7.1 等离子体太阳电池	171
7.1.1 概述	171
7.1.2 金属纳米颗粒的材料及沉积工艺	172
7.1.3 金属 Ag 纳米颗粒的应用	172
7.1.4 金属 Au 纳米颗粒的应用	178
7.1.5 讨论	179
7.2 量子点太阳电池	180
7.2.1 突破 Shockley-Quessier 极限	180
7.2.2 化合物多结叠层太阳电池	181
7.2.3 量子点叠层电池	182
7.2.4 热载流子电池	184
7.2.5 多激子 (MEG) 电池	186
参考文献	187

后记

索引

第 1 章

绪 论

1.1 概述

近二十年来,人类社会的经济总量和物质文明都得到了空前的高度发展,这些主要得益于科学与技术的进步和推动,特别是信息、材料、能源、航天、生物等科技领域的突飞猛进,使人们更加坚信科学发现与技术发明就是人类社会经济发展的催化剂和加速器。随着人类对自然认识的不断加深和反思,科学发展与和谐发展正在成为人类社会发展的主旋律,人们关注科技创新,同时也更加关注可持续发展,这就需要人们追求科学与自然的和谐相处、技术与经济的合理匹配、资源与利用的持续循环、发展与环境的友好协调等。在这发展过程中,另外两大科技也有显著和重大发展,愈来愈成为人们关注的焦点和热点课题,并不断地推动相关产业快速发展,而且可以预见,在将来相当长的时间内,这两大科技将日益交融,互相渗透、互相促进,这就是持续数年而至今热度不减的纳米技术与太阳能技术。

随着全球经济的快速发展和人口的大量增加,据估计 2006 年到 2030 年之间,每年全球能源消耗量将上升 40% 以上。而我们目前大量依赖的能源主要来自于日益枯竭的化石燃料,如石油、天然气和煤。同时,二氧化碳的大量排放带来的温室效应将会进一步加剧地球变暖。因此,各国都在研究并应用许多潜力巨大的可再生能源技术,如太阳能、风能、生物质能、海洋能、地热能等,并一直致力于通过减少可再生能源的成本,来缓解全球对化石能源的依赖及对环境造成的危害。京都协定书的签订标志人类正在向可持续发展的方向努力。人类应当从利用“昨日阳光”逐步过渡到利用“今日阳光”。太阳能由于具有独特的优势是发展的重要的可再生能源之一。太阳每年辐射至地球表面的能量约为 3×10^{24} 焦耳,相当于目前全球商业能源消耗量的 10000 倍左右^[1]。

太阳能利用主要包括太阳能热利用与光伏发电技术两方面。我国作为发展中国家,能源和环境问题对我国的经济发展尤为重要。特别是 2005 年 2 月通过的《中华人民共和国可再生能源法》将进一步促进我国太阳能产业的发展。我国在太阳能热利用方面为世界做出了巨大的贡献,已经成为全世界最大的太阳能热水器生产和应用的国家。其中重要的技术突破是纳米材料为主的太阳光谱选择性吸收薄膜材料的发展。太阳电池是基于半导体材料的光伏效应,通过 p-n 结直接将太阳光转换成电能的一种光电转换器件。在 20 世纪 60 年开始,太阳电池主要在航天领域应用,

而从 20 世纪末到 21 世纪初以来,世界各国尤其是德国、日本和美国等西方发达国家先后发起的大规模国家光伏发展计划和太阳能屋顶计划,在此刺激和推动下,世界太阳能光伏产业以每年 30% 以上的增长率快速发展,太阳能电池总产量的平均年增长率则是高达约 50% 以上。尽管目前世界光伏发电累积装机容量不到世界电力装机总容量的千分之一,但是作为一种可再生的清洁能源,专家预测,光伏发电将在 21 世纪前半期成为最重要的基础能源之一^[2]。2007 年中国太阳能电池产量一跃成为世界第一,直到如今,我国太阳能电池产量一直保持世界领先地位,光伏发电成本已大幅下降,如 2010 年敦煌 10MW 光伏电站的招标电价已降到了每千瓦时 1.09 元。2011 年国家有关部门已经下调光伏发电上网电价为每千瓦时 1.00 元,并确定了在 2015 年光伏发电成本降至每千瓦时 0.80 元,2020 年降至每千瓦时 0.6 元的战略目标。但相对于传统化石能源的成本仍然较高,要实现这一目标,需要进一步提高太阳能利用的效率和进一步降低成本。

据预测人类的第四次工业革命有可能在纳米技术、可再生能源技术、量子信息或基因工程技术中诞生。从 20 世纪 80 年代末到 90 年代初,在德国、美国和日本等发达国家,纳米材料与技术开始进入人们的视野,立刻引起了物理学、材料学、化学等方面科学家的极大关注。从科学发展来看,纳米材料与技术作为一个新的技术门类渗透性很强,对与太阳能技术这样的综合学科,具有很好的学科交叉亲和力和技术结合包容性。事实上,二十年来太阳能科技的一大亮点就是纳米薄膜在光热转换器件和太阳能电池中的应用,如太阳能光谱选择性吸收薄膜、染料敏化纳米晶太阳能电池、纳米晶硅薄膜太阳能电池及新型太阳能电池等。所以纳米技术与太阳能技术可以很好地相互融合与相互促进,随着纳米技术的发展,借助纳米材料独特的光、电、力学性能,其在太阳能技术中的应用也越来越广,将可能进一步提高太阳能利用的效率和降低太阳能利用技术的成本。最典型的代表是纳米技术在染料敏化太阳能电池中的应用,如在 20 世纪 90 年代以前,染料敏化太阳能电池的光电转换效率很低,不到 1%。直到 1991 年 M. Grätzel 教授将纳米晶技术引入到染料敏化太阳能电池的研究中,首次在《Nature》上报道效率是 7.1%,其主要技术突破归结于纳米晶薄膜的多孔性使得它的总表面积远大于其几何面积,可以吸附大量的染料,从而可有效地吸收太阳光^[3]。同时染料敏化太阳能电池的技术一直在向前发展,各种新颖结构的功能纳米材料如纳米线、纳米管等一维纳米材料,由于其具有纵向导电的优势而在染料敏化太阳能电池中得到应用。最新的关于染料敏化太阳能电池的报道效率已经达到 12%^[4]。体现了纳米技术与太阳能电池利用的完美结合。

1.2 纳米材料的概念、发展与分类^[5~11]

2011 年 10 月 18 日欧盟委员会则将纳米材料定义为一种由尺寸在 1~100nm 之间基本颗粒组成的天然或人工材料。从广义上讲,纳米技术是指在 1~100nm 尺度

范围内研究原子、分子的结构及其相互作用并加以应用的技术,是现代科学(量子力学、介观物理学和分子生物学)与现代技术(计算机、微电子和扫描隧道显微镜)结合的产物。通过操作原子、分子或原子团和分子团制备所需的材料,使人类认识和改造自然界的能力扩展到微观领域。20世纪80年代,对纳米材料的研究已经成为材料科学中的一个重要分支。这些纳米材料最令人惊奇的特征是它们的物理和化学性质不同于它们是块体材料时的固体的性质。在纳米晶体表面的原子数量与在内部处于晶格位置上的原子数量相当。如此,纳米材料显示了一系列特殊性能,如小尺寸效应、表面效应、宏观量子隧道效应和量子限域效应等新的性能,使得纳米材料具有不同于宏观物体的光、电、热、磁、力学和机械等性能。

纳米材料按结构可分为零维、一维及二维结构。零维纳米材料主要是指纳米粒子,如贵金属纳米粒子、半导体胶体量子点材料等都是典型的零维纳米材料。一维纳米材料主要包括纳米线、纳米棒、纳米管等。1991年,日本科学家 Lijima 等发现了碳纳米管以后,科学家们陆续合成了各种半导体材料如 TiO_2 、 ZnO 、 WO_3 、 V_2O_5 、 CdSe 、 CuInSe_2 等,由于它们具有纵向的电子传输结构而在太阳电池的研究领域中受到重视。二维纳米材料主要是指超薄膜、多层膜等,如具有双吸收层或多吸收层结构的金属陶瓷选择性吸收涂层即是一种典型的多层膜结构,在太阳能光热转换过程中起着十分重要的作用;又如具有单银结构或者双银结构的低辐射薄膜,在调制太阳光的入射及节能窗领域得到广泛的应用;再如具有多层膜结构的电致变色、光电致变色薄膜在智能型节能窗领域得到广泛的研究;而由纳米硅薄膜构成的第三代太阳电池,则由于可望突破 Shockley-Quessier 极限而得到广泛关注;此外,石墨烯材料也是典型的超薄膜材料,由于其具有优异的电学性能且导电性能可以根据其表面基团的改变而任意剪裁,近年来成为研究热点,在太阳电池领域具有潜在的应用。

此外,在纳米材料中还有另一类尺度划分在 $1\sim 10\text{nm}$ 的准零维纳米材料,称为量子点。量子点和超晶格在新概念太阳电池中的应用也是当前研究的热点。电子在块体材料里,在三个维度的方向上都可以自由运动。但当材料的特征尺寸在一个维度上与光波波长、德布罗意波长以及超导态的相干长度等物理特征尺寸相当或更小时,电子在这个方向上的运动会受到限制,电子的能量不再是连续的,而是量子化的,我们称这种材料为超晶格、量子阱材料。量子膜材料是电子只能在膜层的二维空间内运动,一个方向上受到限制;量子线是电子只能沿着量子线方向自由运动,另外两个方向上受到限制;量子点材料是指在材料三个维度上的尺寸都要比电子的德布罗意波长小,电子在三个方向上都不能自由运动,能量在三个方向上都是量子化的。由于上述的原因,电子的态密度函数也发生了变化,块体材料是抛物线,电子在这上面可以自由运动;如果是量子点材料,它的态密度函数就像是单个的分子、原子那样,完全是孤立的函数分布,因此量子点又被称为“人造原子”。

Ekimov^[12], Efros^[13]和 Papavassiliou^[14]首先在20世纪80年代初报道了量子

尺寸效应,之后人们发展了不同的理论以计算特定尺寸的半导体量子点的带隙。对于尺寸很小的量子点来说,电子和空穴也就是激子的束缚能以及激子之间的相互能量比块体材料的能量要高得多。由 Efros^[13] 在 1982 年提出有效质量近似模型,随后由 Brus 改进^[15]。这一模型是假设颗粒处在一个势阱中,颗粒边界的势垒无限大。由这一模型推导的球状半导体量子点的带隙宽度随半径变化的解析表达式,如(1-1)所示^[15]:

$$E_g^{\text{QD}}(R) = E_g + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2R^2} \left[\frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h} \right] - \frac{1}{\epsilon R} \quad (1-1)$$

式中, $\hbar$ 为普朗克常数; m_e 和 m_h 分别是电子和空穴的有效质量; ϵ 是量子点材料的介电常数。

尽管在推导过程做了简化的假设,公式(1-1) 仍然确定的表明了有效带隙宽度受尺寸的影响非常大,从而尺寸也影响了量子点的电学和光学性质。在公式(1-1) 右边的第一项 E_g 代表半导体块体材料的带隙值。第二项是电子和空穴的量子束缚能;这一项的值随量子点半径(R)的减小而增大,与 R^{-2} 成正比。第三项表征的是电子-空穴间的库仑吸引力^[16],随 R^{-1} 变化。既然库仑吸引力随量子束缚作用的增强而增大,则第三项的值与量子束缚的作用抵消,使量子点的有效带隙值 E_g^{QD} 向低能量的方向偏移。然而,当量子点的尺寸小到一定程度时,电子和空穴的量子束缚能的值大于库仑力,这样,量子点的有效带隙值就随尺寸的减小而增大。由于量子点的激发态能量增大,与此对应的吸光和发射光谱则会发生“蓝移”的现象。这一现象应用在太阳能电池上将改变太阳能电池材料的光谱吸收。

同时量子点在太阳能电池的另一应用是量子点多激子效应。半导体量子点中的量子束缚效应能改变太阳能电池中弛豫发生的速度,这就存在一个可能性,使用量子点的太阳能电池的效率可以进一步提高超过 Shockley-Queisser 局限^[17]。量子点的量子限制效应能够减慢高能电荷载体的冷却速率,这一观点首先是由 Nozik 提出的^[18],而最近也得到了实验的证实^[19~22]。这种减慢作用是由于量子点的不连续能量状态,能态之间的能量差值比激发声子的能量要大。这种能量的不匹配减慢了电子和空穴的弛豫,这种现象被称为“声子瓶颈”^[18]。量子点吸收光子后产生了电子和空穴对,这一呈电中性的电子空穴对又称为激子。被激发的激子回复基态的速度减慢使得以下的过程能够发生:产生多个激子,或者能够抽取高能电子,加强光子的转换效率。当光子的能量小于半导体的 E_g 值时,半导体中不能产生激子,光子能量大于 E_g 值时,半导体吸收一个光子能产生一个激子。因此,当前所有的光激发产生电子-空穴对的效率,不是 0 就是 1,高于 E_g 值的能量都被热化弛豫损失了。而半导体的量子点、量子线等材料在吸收能量是 E_g 2 倍以上的光子时,能将高于它们 E_g 的能量通过俄歇激发方式,激发出另一对电子空穴对,这就可以成倍地增加光生载流子的产生率,即多激子产生效应。高能电子抽取即是在光生电子和空穴还没来得及冷却时就被抽取流向电极,要让载流子在能量高处就被抽取,必须延长

弛豫时间,或者说降低“冷却”速度^[23]。而量子材料中的“声子瓶颈”效应降低了热载流子冷却过程,有利于热载流子的抽取。多激子产生效应和热载流子的抽取能分别提高光电电池的光电流和光电压^[19]。尽管这两个过程在原理上都意味着采用量子点的电池的效率能够超过 Shockley-Queisser 局限,然而这些效应是相互抵消相互竞争的。在不同的半导体量子点溶胶中,多激子产生的现象已经得到了证实^[24,25]。

1.3 纳米材料在太阳电池中的应用

目前,光伏发电在能源市场中所占比重还不足 1%,阻碍其发展的因素主要是:①效率问题;②成本问题;③同时满足以上两个目标的技术难点。以上的这些问题引出了另一个我们即将要探讨的主题:纳米技术是否可以解决这些问题?如果可以,要如何解决?

1.3.1 硅纳米线太阳电池^[26~34]

在太阳电池中,提高对太阳光的吸收是提高太阳电池转换效率的一个重要途径。采用在太阳电池的前表面刻蚀出硅纳米线阵列的方法,能大大减少太阳电池的反射率,而且由于硅纳米线阵列能显著提高载流子的收集率,从而能够采用质量较差、价格较为低廉的硅片来制作高效率太阳电池。目前硅纳米线太阳电池有硅纳米线阵列太阳电池和单根同轴硅纳米线太阳电池两种。

Peng 等^[26]首次利用 HF-AgNO₃ 系统,制作了大面积硅纳米线阵列太阳电池,在 300~600nm 波段,反射率达到 1.4% 左右,而在 300~1000nm 波段,平均反射率为 2%。Hu 等^[31]采用模拟和计算的方法,分析了硅纳米线阵列对光的吸收,证明了硅纳米线阵列在很宽的波长范围内具有良好的吸收光子的能力。Kayes 等^[32]模拟和计算了辐射状 p-n 结的硅纳米线阵列太阳电池,从理论上指出辐射状 p-n 结的纳米线阵列太阳电池具有更高的载流子收集率,因此可采用质量较差的硅片制作高效太阳电池。Tian 等^[33]制作了世界上第一根单根同轴硅纳米线太阳电池,转换效率为 3.4%,该单根同轴硅纳米线太阳电池具有广阔的纳米电子器件的使用前景,成为国际上研究纳米电子器件的一个新的热门课题。随后,Kelzenberg 等^[34]采用气液固(VLS)生长工艺生长硅纳米线阵列,并在硅纳米线阵列上制作减反射薄膜以实现更好的减反射效果,并在硅基底背面安装银反射器。

目前硅纳米线太阳电池的研究刚刚起步,硅纳米线阵列太阳电池现今存在着 p-n 结质量较差,表面复合太高,电极难以制作和电极的欧姆接触较差等一系列问题需要解决。同时,单根同轴硅纳米线太阳电池也是研究纳米电子器件的一个热门课题。

1.3.2 表面钝化纳米技术在高效晶体硅电池上的应用

高效晶体硅电池技术也在不断发展之中,除了太阳电池工艺与生产技术的发展