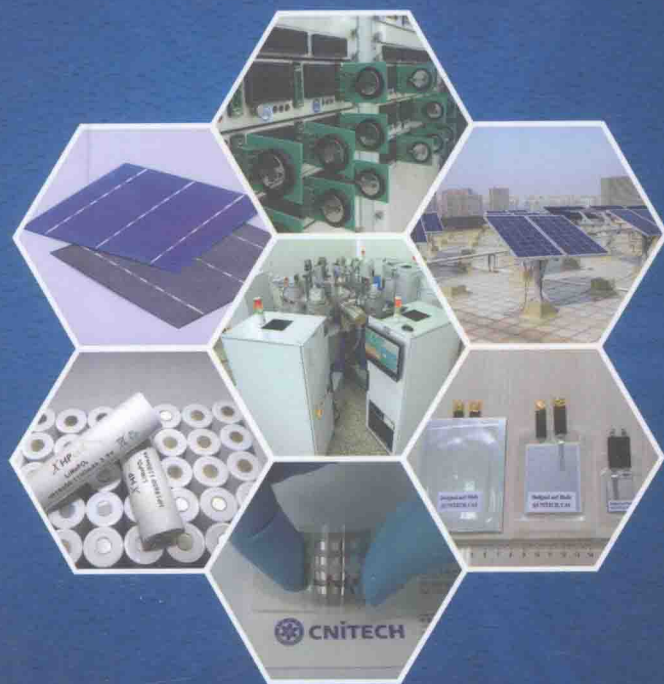


# 新能源材料科学 与应用技术

《新能源材料科学与应用技术》编委会



科学出版社

中国科学院宁波工业技术研究院(筹)科技协同创新丛书

# 新能源材料科学与应用技术

《新能源材料科学与应用技术》编委会

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书内容包括硅基太阳能电池、化合物太阳能电池、聚合物太阳能电池、有机/无机杂化太阳能电池材料和应用技术,以及锂离子电池、锂空气电池、锂硫电池、全固态锂电池材料与应用技术,系统阐述了多种太阳能电池、锂电池材料与技术的基本科学原理,探讨了获取高性能太阳能电池和锂电池新材料的知识和方法,重点介绍了国内外相关领域的最新研究进展和前景展望。

本书涉及的新能源材料类型多、应用广,适合能源材料与技术领域的研究人员、工程师及相关专业人员阅读,可以向读者提供广泛的知识交叉和技术交叉信息,启发和促进各自专业知识的学习和技术的研发。

### 图书在版编目(CIP)数据

新能源材料科学与应用技术/《新能源材料科学与应用技术》编委会编.  
—北京:科学出版社,2016  
(中国科学院宁波工业技术研究院(筹)科技协同创新丛书)  
ISBN 978-7-03-047298-4

I. 新… II. 新… III. 新能源-材料科学-研究 IV. TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 025169 号

责任编辑:裴 育 罗 娟 / 责任校对:桂伟利  
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 1/16  
2016 年 2 月第一次印刷 印张:27 1/2  
字数:537 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

中国科学院宁波工业技术研究院(筹)  
科技协同创新丛书

主 编： 崔 平  
执行主编： 何天白  
编 委： 朱 锦 杨桂林 陈 亮

《新能源材料科学与应用技术》编委会

主 编： 韩伟强  
副 主 编： 方俊锋 葛子义 刘兆平 宋伟杰  
          王德宇 许晓雄 叶继春  
编 委： 高平奇 酒同钢 刘子莹 孟 阵  
          欧阳新华 田华军 夏永高 许 炜  
          姚霞银 祝炬烨

## 序 言

能源是世界万物运动的动力,也是人类文明进步的物质基础。伴随着人类文明的进步,人们对能源的认识程度不断深入,对能源的需求和利用与日俱增,能源与相关的环境问题已经成为人类可持续发展面临的重要问题。因此,发展洁净、可再生的新能源技术刻不容缓。新能源技术是指区别于现有传统能源的开发及利用技术,也泛指在能源的转换-存储-利用各个环节中提高效率和寻找替代的技术。新能源技术不仅承载着能源本身所带来的效用,也是科学、经济、社会发展的动力之一。当今世界,新能源作为新兴产业,其技术的发展是经济和文明延续的必要保障,也是推动全球经济振兴的强大动力。

21世纪以来,由于能源与环境问题的凸显,各国政府纷纷注入资金发展新能源技术,并且把发展能源技术作为未来新经济增长的重点之一,新能源技术的研发与产业化也随之快速发展。政府主导的这种能源热也带动着其他行业的发展和结构调整,如面向满足新能源技术要求的新材料开发、工业界能源使用效率的提高、传统能源的高效利用、新能源服务业的完善、建筑节能技术的优化,以及建立满足新能源应用需求的相应基础设施等。新能源行业的发展不仅涉及技术本身,还渗透到其他经济、社会建设中,能源热逐渐蔓延全球。

传统能源(如煤、石油、天然气和水力等)属于密集型能源,其开发和利用技术重在“节流”,提高能源转换效率和综合利用效率是节能的主要途径,包括工业节能、建筑节能、智能电网、节能照明、能源转换技术等。另一方面,发展新能源技术的直接目的是寻找更多的能源及提高能源利用率。新型能源的开发属于“开源”,包括核能、太阳能、生物质能、海洋能、地热能、氢能和风能等,新能源在时间和空间上绝大多数属于分布式能源。简而言之,新能源技术是围绕开源节流发展的技术。以太阳能利用为例,当前除了要发展和提升占有主导地位的硅太阳能电池技术以外,还要探索和开发新的低成本和高转换效率的光伏材料与器件;此外,重点发展高能量密度、高功率密度和大规模廉价储能技术也是优化能源结构的必要环节。

2009年,中国科学院、浙江省和宁波市高瞻远瞩,决定开展中国科学院宁波材料技术与工程研究所的二期建设,共建中国科学院宁波工业技术研究院,布局新材料、新能源、先进制造和医疗器械与医学工程四大领域。其中,新能源技术研究所所以国家新能源规划为指导,以向国家、地方的新能源产业提供技术为目的,重点开展洁净可再生能源转换技术、储能技术、节能减排等方面的研究。新能源技术研究所定位于新能源领域的应用性研究,秉承中国科学院宁波材料技术与工程研究所

“料要成材，材要成器，器要好用”的建所理念，解决材料制备与应用的关键技术问题，推动新能源产品的产业化。

《新能源材料科学与应用技术》是中国科学院宁波工业技术研究院(筹)科技协同创新丛书系列之一，该书针对能源转换与存储环节中提高转换与利用效率的材料与技术，系统阐述新型太阳能电池、锂电池材料与技术的基本科学原理，重点介绍硅基太阳能电池、化合物太阳能电池、聚合物太阳能电池、有机/无机杂化太阳能电池等多种太阳能电池以及动力锂离子电池、全固态锂电池、锂硫电池、锂空气电池等新型储能材料与技术的最新研究进展和前景展望，探讨获取高性能太阳能电池和储能新材料的知识和方法。该书是中国科学院宁波工业技术研究院(筹)新能源技术研究所科研人员多年科研成果和知识积累的提炼与总结，相信对从事新能源材料与技术领域的研发人员、企业家、研究生、本科生以及公务员和能源爱好者具有较高的参考价值。



中国科学院院士

2015年12月

## 前 言

能源工业是国民经济的基础产业,也是技术密集型产业。“安全、高效、低碳”集中体现了现代能源技术的特点,也是抢占未来能源技术制高点的主要方向。新能源的发展水平是一个国家和地区高新技术发展水平的体现,是当今国际政治、经济竞争的战略制高点。

目前对新能源的开发主要集中在太阳能、氢能、风能、地热能等可再生能源,其中太阳能资源丰富、分布广泛,是最具发展潜力的可再生能源。随着全球能源短缺和环境污染等问题日益突出,太阳能光伏发电因其清洁、安全、便利、高效等特点,已成为世界各国普遍关注和重点发展的新兴产业。近年来,我国太阳能光伏产业发展迅速,已成为我国为数不多的、可以同步参与国际竞争且有望达到国际领先水平的行业。然而,目前市场主流的太阳能光伏发电仍受组件成本高、光电转换效率低的限制,全寿命发电成本高于传统电力,加之缺乏自己的核心技术,制约了太阳能光伏产业的发展。因此,围绕低成本和高效率的主要思路,研究和开发新型技术和替代材料,才能突破现有技术和原理的局限。值得指出的是,与传统能源相比,包括太阳能在内的新能源具有间歇性和不可控性,易受气候和天气的影响,因此新能源发电设备中需要配备储能装置,来解决电力平衡问题,储能技术应当和可再生能源技术一同放在优先考虑的位置,战略意义重大。可以预见,新能源动力时代即将到来,发展新能源汽车是能源和环境的必然要求,我国在这方面发展的压力尤为紧迫。车用动力蓄电池是新能源汽车产业化的关键,锂电池将成为未来车用动力蓄电池的明星,是未来动力蓄电池发展的必然方向。

本书由中国科学院宁波工业技术研究院(筹)新能源技术研究所光伏团队与储能团队组织编写,系统阐述新型太阳能电池、锂电池材料与技术的基本科学原理,重点介绍硅基太阳能电池、化合物太阳能电池、聚合物太阳能电池、有机/无机杂化太阳能电池等多种太阳能电池以及动力锂离子电池、全固态锂电池、锂硫电池、锂空气电池等新型储能材料与技术的最新研究进展和前景展望,探讨获取高性能太阳能电池和锂电池新材料的知识和方法。本书共10章,由韩伟强研究员负责策划和组织编写,应华根博士与忻敏君主管负责统稿。其中,第1章由叶继春研究员与王德宇研究员共同编写,主要介绍太阳能电池技术与储能技术的基本原理与总体概况;第2章由叶继春研究员、高平奇博士和祝炬焯博士共同编写,介绍晶体硅、非晶硅、薄膜晶硅等硅基太阳能电池的研究现状与发展趋势;第3章由宋伟杰研究员和许炜博士共同编写,介绍多种化合物太阳能电池的制备技术与发展趋势;第4

章由葛子义研究员和欧阳新华博士共同编写,介绍聚合物太阳能电池的研究现状与发展展望;第5章由方俊锋研究员和酒同钢博士共同编写,介绍钙钛矿、染料敏化等有机/无机杂化太阳能电池的发展现状与产业化前景;第6和7章分别介绍锂离子正极材料与负极材料的研究现状与发展趋势,第6章由刘兆平研究员和夏永高博士共同编写,第7章由韩伟强研究员和田华军博士共同编写;第8章由许晓雄研究员和姚霞银博士共同编写,介绍无机固体电解质材料以及全固态锂电池的特点与研究进展;第9章由韩伟强研究员和孟阵博士共同编写,介绍锂硫电池的工作原理与研究进展;第10章由王德宇研究员和刘子萱博士共同编写,介绍锂空气电池的研究进展与发展趋势。

感谢本书编写过程中得到的各级各类科技计划支持,包括国家科技部863计划和973计划,国家自然科学基金,国家发改委产业化项目,工信部国防科工局专项,中国科学院战略性先导科技专项、装备研制项目和知识创新工程重要方向性项目,浙江省重点创新团队计划,宁波市重大攻关项目和科技创新团队计划等。

希望本书的出版能对太阳能光伏技术和储能技术的发展和應用有所促进。在本书的编写过程中,作者尽量以国内外发表的原始论文和专著为参考,并列出了许多作者研发团队的研究成果。

由于作者水平有限,难免会存在不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。



# 目 录

序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 太阳能电池发展现状简介	1
1.2 太阳能电池原理	6
1.2.1 太阳能电池性能表征	8
1.2.2 太阳能电池效率分析	10
1.3 太阳能电池发展现状及发展前景	14
1.3.1 硅基太阳能电池	14
1.3.2 化合物太阳能电池	16
1.3.3 聚合物太阳能电池	16
1.3.4 有机/无机杂化太阳能电池	17
1.4 锂离子电池发展现状简介	18
1.4.1 电池发展简史	18
1.4.2 锂电池的诞生与发展	19
1.4.3 锂离子电池的诞生与发展	20
1.5 锂离子电池的工作原理	21
1.6 主要相关学科	22
1.7 电池化学基础	23
1.7.1 电势	23
1.7.2 电极反应控制步骤	23
1.7.3 电极反应总量	24
1.8 锂离子电池发展趋势	24
参考文献	25
第 2 章 硅基太阳能电池	33
2.1 硅基太阳能电池简介	33
2.2 晶体硅太阳能电池	33
2.2.1 晶体硅太阳能电池发展历史	34
2.2.2 高效晶体硅太阳能电池关键技术	43
2.2.3 晶体硅太阳能电池发展瓶颈	51

2.3 非晶/微晶硅太阳能电池 .....	51
2.3.1 非晶硅材料研究历史 .....	51
2.3.2 非晶硅材料 .....	52
2.3.3 微晶硅材料 .....	53
2.3.4 非晶/微晶硅太阳能电池技术 .....	53
2.3.5 非晶/微晶硅太阳能电池发展瓶颈 .....	56
2.4 薄膜晶体硅太阳能电池 .....	57
2.4.1 薄膜晶体硅太阳能电池研究历史 .....	57
2.4.2 薄膜晶体硅太阳能电池技术 .....	59
2.4.3 薄膜晶体硅太阳能电池发展瓶颈 .....	61
参考文献 .....	62
<b>第3章 化合物太阳能电池 .....</b>	<b>69</b>
3.1 化合物太阳能电池简介 .....	69
3.1.1 化合物结构及能带图 .....	69
3.1.2 化合物电池分类 .....	71
3.2 GaAs 太阳能电池 .....	72
3.2.1 GaAs 太阳能电池发展历史 .....	72
3.2.2 GaAs 太阳能电池技术趋势及发展瓶颈 .....	75
3.3 InP 太阳能电池 .....	75
3.3.1 InP 太阳能电池发展历史 .....	75
3.3.2 InP 太阳能电池制备技术及发展趋势 .....	76
3.4 CdTe 太阳能电池 .....	77
3.4.1 CdTe 太阳能电池发展历史及现状 .....	77
3.4.2 CdTe 太阳能电池制备技术及发展趋势 .....	78
3.5 CIGS 太阳能电池 .....	82
3.5.1 CIGS 太阳能电池发展历史 .....	82
3.5.2 CIGS 薄膜电池结构 .....	83
3.5.3 CIGS 薄膜制备技术 .....	84
3.5.4 CIGS 太阳能电池技术发展趋势 .....	85
3.6 CZTS 太阳能电池 .....	86
3.6.1 CZTS 太阳能电池吸收层介绍 .....	86
3.6.2 CZTS 薄膜制备技术 .....	88
3.6.3 CZTS 太阳能电池技术瓶颈 .....	92
3.7 主要应用及前景展望 .....	92
3.7.1 地面应用 .....	92

3.7.2 空间应用·····	94
3.7.3 化合物太阳能电池前景展望·····	94
参考文献·····	95
<b>第4章 聚合物太阳能电池</b> ·····	<b>100</b>
4.1 聚合物太阳能电池简介·····	100
4.2 聚合物太阳能电池基本原理·····	101
4.2.1 光生伏特效应·····	101
4.2.2 主要参数·····	104
4.3 受体材料研究进展·····	107
4.3.1 受体材料的特点和设计原理·····	107
4.3.2 富勒烯衍生物电子受体材料·····	109
4.3.3 设计、引入新型富勒烯衍生物提高光伏器件的 $J_{sc}$ 和 FF·····	127
4.3.4 有机化合物电子受体材料·····	134
4.4 聚合物给体材料·····	147
4.4.1 聚苯乙烯类给体材料·····	148
4.4.2 聚噻吩类给体材料·····	149
4.4.3 聚苝基类给体材料·····	152
4.4.4 聚苯并二噻吩类给体材料·····	153
4.4.5 其他 D-A 聚合物给体材料·····	155
4.5 聚合物太阳能电池结构及研究现状·····	156
4.5.1 本体异质结电池·····	156
4.5.2 载流子的输运动力学·····	158
4.5.3 串联电池研究·····	159
4.5.4 柔性聚合物太阳能电池研究·····	162
4.5.5 聚合物太阳能电池的大面积制备·····	165
4.6 主要研究现状及前景展望·····	166
参考文献·····	168
<b>第5章 有机/无机杂化太阳能电池</b> ·····	<b>179</b>
5.1 铅卤钙钛矿型太阳能电池的研究进展·····	179
5.1.1 引言·····	179
5.1.2 铅卤钙钛矿太阳能电池·····	180
5.1.3 总结和展望·····	187
5.2 染料敏化太阳能电池·····	188
5.2.1 背景及历史·····	188
5.2.2 染料敏化太阳能电池的结构和工作原理·····	189

5.2.3	染料敏化太阳能电池的研究进展	191
5.2.4	染料敏化太阳能电池的产业化进展	197
5.3	其他有机/无机杂化太阳能电池	198
5.3.1	有机/无机杂化太阳能电池的结构和工作原理	199
5.3.2	有机/无机杂化太阳能电池的分类和进展	201
5.3.3	存在的问题及挑战	204
	参考文献	205
<b>第6章</b>	<b>锂离子电池正极材料</b>	<b>214</b>
6.1	正极材料简介	214
6.2	层状正极材料	214
6.2.1	LiCoO <sub>2</sub> 材料	214
6.2.2	LiNi <sub>x</sub> Co <sub>y</sub> Mn <sub>1-x-y</sub> O <sub>2</sub> 材料	217
6.2.3	LiNi <sub>x</sub> Co <sub>y</sub> Al <sub>1-x-y</sub> O <sub>2</sub> 材料	221
6.2.4	富锂层状正极材料	223
6.3	聚阴离子正极材料	229
6.3.1	LiFePO <sub>4</sub> 正极材料	230
6.3.2	LiMnPO <sub>4</sub> 正极材料	232
6.3.3	NASICON结构的正极材料	236
6.3.4	硅酸盐正极材料	236
6.4	尖晶石型正极材料	237
6.4.1	尖晶石型LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 材料	237
6.4.2	尖晶石型高电压LiNi <sub>0.5</sub> Mn <sub>1.5</sub> O <sub>4</sub> 材料	240
	参考文献	242
<b>第7章</b>	<b>高性能锂离子电池负极材料</b>	<b>253</b>
7.1	锂离子电池负极材料简介	253
7.1.1	锂离子电池的组成和工作原理	253
7.1.2	锂离子电池负极材料的发展简史	255
7.1.3	锂离子电池负极材料的分类和应用	257
7.1.4	商业化锂离子电池负极材料的技术瓶颈与展望	262
7.2	高性能硅基负极材料	263
7.2.1	硅基负极材料的分类和应用	265
7.2.2	硅基负极材料电极的嵌/脱锂机制与性能测试	268
7.2.3	硅基负极材料的容量衰退机制	268
7.2.4	硅基负极材料的合成及碳包覆技术	270
7.2.5	硅基负极材料的现状及前景展望	272

7.3 高性能锆基负极材料 .....	272
7.3.1 锆基负极材料的物理化学性质 .....	272
7.3.2 锆基负极材料的制备技术 .....	273
7.3.3 锆基负极材料的改性 .....	274
7.3.4 锆基负极材料的前景展望 .....	278
7.4 高性能锡基负极材料 .....	278
7.4.1 锡基负极材料的分类 .....	278
7.4.2 锡基负极材料的制备方法 .....	279
7.4.3 锡基合金负极材料的储锂机制与容量衰减机理 .....	280
7.4.4 锡基负极材料的设计及其在锂电池中的应用 .....	282
7.4.5 锡基负极材料的前景展望 .....	289
7.5 其他新型高性能负极材料 .....	290
7.5.1 其他新型负极材料的分类 .....	290
7.5.2 其他新型负极材料的储锂机制 .....	290
7.5.3 其他新型负极材料的设计和合成 .....	292
7.5.4 其他新型负极材料的前景展望 .....	296
参考文献 .....	297
<b>第8章 无机固体电解质材料及全固态锂电池</b> .....	<b>308</b>
8.1 引言 .....	308
8.2 全固态锂电池概述 .....	310
8.3 无机固体电解质 .....	312
8.3.1 固体电解质中离子运动 .....	313
8.3.2 影响电导率的因素 .....	315
8.3.3 NASICON 结构型固体电解质 .....	319
8.3.4 石榴石结构型固体电解质 .....	324
8.3.5 硫化物锂离子固体电解质 .....	329
8.4 全固态锂电池正极-电解质界面的优化与控制 .....	340
8.4.1 全固态锂电池界面结构 .....	341
8.4.2 正极-电解质界面的优化与控制 .....	342
8.4.3 无机全固态锂电池的设计与构建 .....	343
8.5 全固态锂电池研究进展 .....	344
8.5.1 薄膜型全固态锂电池 .....	345
8.5.2 大容量聚合物全固态锂电池 .....	346
8.5.3 大容量无机全固态锂电池 .....	347
8.6 展望 .....	349
参考文献 .....	350

<b>第 9 章 锂硫电池</b> .....	358
9.1 锂硫电池简介 .....	358
9.1.1 锂硫电池的组成和工作原理 .....	358
9.1.2 锂硫电池的发展历史 .....	360
9.1.3 锂硫电池的主要问题 .....	361
9.2 锂硫电池研究动态 .....	362
9.2.1 正极材料 .....	362
9.2.2 负极材料 .....	384
9.2.3 电解质、隔膜与黏结剂 .....	385
9.2.4 锂硫电池结构 .....	389
9.3 锂硫电池应用展望 .....	391
参考文献 .....	391
<b>第 10 章 高能量密度锂空气电池</b> .....	400
10.1 锂空气电池简介 .....	400
10.2 锂空气电池分类 .....	401
10.2.1 有机电解质锂空气电池 .....	402
10.2.2 固体电解质、水系电解液和混合电解液锂空气电池 .....	403
10.3 有机电解质锂空气电池中的实际充放电反应 .....	404
10.3.1 锂氧化物的生成与分解 .....	404
10.3.2 副产物的生成与分解 .....	405
10.4 锂空气电池电解液的研究进展 .....	410
10.4.1 电解液溶剂 .....	410
10.4.2 电解质 .....	411
10.5 锂空气电池正极材料和催化剂的研究进展 .....	412
10.5.1 正极材料和结构 .....	412
10.5.2 正极催化剂 .....	414
参考文献 .....	421

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 太阳能电池发展现状简介

太阳能来自于太阳内部核聚变所蕴藏的巨大能量。据粗略估计,太阳辐射的总能量流为  $4 \times 10^{26} \text{J/s}$ ,其中向地球输送的光和热约达  $1.8 \times 10^{17} \text{J/s}$ ,相当于燃烧  $4 \times 10^8 \text{t}$  烟煤所产生的能量。一年中太阳辐射到地球表面的能量相当于人类现有各种能源在同期内所提供能量的上万倍。与石油、煤、天然气等能源的价格随着供应量和储量的变化而波动不同,伴随着技术的不断进步,人类利用太阳能的成本会逐年下降。近年来,对于可再生能源的开发利用日益受到人们的重视,太阳能由于兼具清洁、安全、能量巨大、分布广泛、长久不衰等特点,逐渐成为未来能源的主要供应形式之一。图 1.1 为各类一次能源使用量的变化趋势<sup>[1]</sup>,在未来的能源结构中,太阳能无疑将占据重要地位。

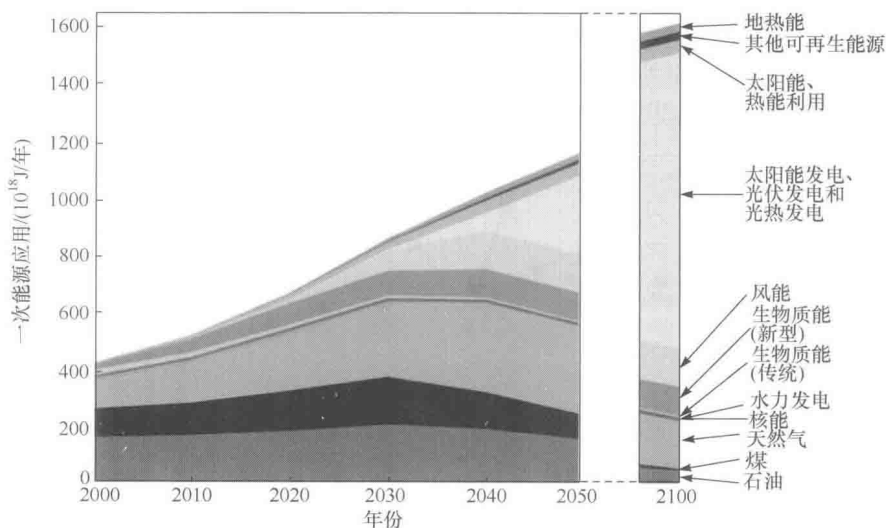


图 1.1 一次能源使用量变化趋势<sup>[1]</sup>

资料来源:全球变化咨询理事会(WBGU)

电力是增长最快的终端能源形式,引领全球能源转型。总体而言,到 2040 年,为应对电力需求的增加,以及替代现有退役装机容量(约占现役装机容量的 40%),需要新增 7200GW 的装机量。国际能源组织(IEA)预测,未来对于可再生

能源利用的强劲增长,将会使可再生能源发电量占全球发电量的比例提高到 1/3,到 2040 年,可再生能源发电量将占全球新增发电量的近 1/2<sup>[2]</sup>,市场规模达数千亿美元。

光伏发电是指利用太阳能电池直接将太阳光能转换为电能的过程,是可再生能源发电中的重要组成部分。目前,它正在快速成长并成为常规化石能源及其他能源利用形式越来越重要的替代品。2014 年上半年,美国光伏发电装机量占美国新增电力装机总量的 53%;而在日本夏季用电高峰期,光伏发电量占总发电量的比例则达到了 37%。我国自 2013 年开始启动了大规模的光伏电站建设计划,当前已经成为年新增光伏装机量最大的国家。从全球光伏行业来看,2002 年至 2012 年十年间,光伏行业市场需求年均复合增长率达 58.5%,从 2002 年的数百兆瓦增至 2012 年的 30GW;2013 年,全球光伏总装机容量为 135GW,其中新增装机容量 40GW,同比增长 33%;2014 年全球光伏新增装机容量为 41GW,2015 年和 2016 年全球光伏新增装机容量将分别达到 55GW 和 65GW。历年光伏市场的变化趋势及绿色科技传媒研究中心(GTM Research)预测情况详见图 1.2<sup>[3]</sup>。中国、日本和美国是光伏需求的主要推动者,同时也聚集了大量的光伏制造企业及光伏应用产品生产商。根据 IEA 2014 年的预测<sup>[4]</sup>,截至 2050 年,光伏发电产能将达 4600GW,将提供全部人类电力需求 16%的份额,约折合 63000 亿千瓦时的电能。按照这一预测,2015 年到 2025 年间,平均年装机量将达到 120GW 以上,2025 年之后有望增加到 200GW/年的水平。

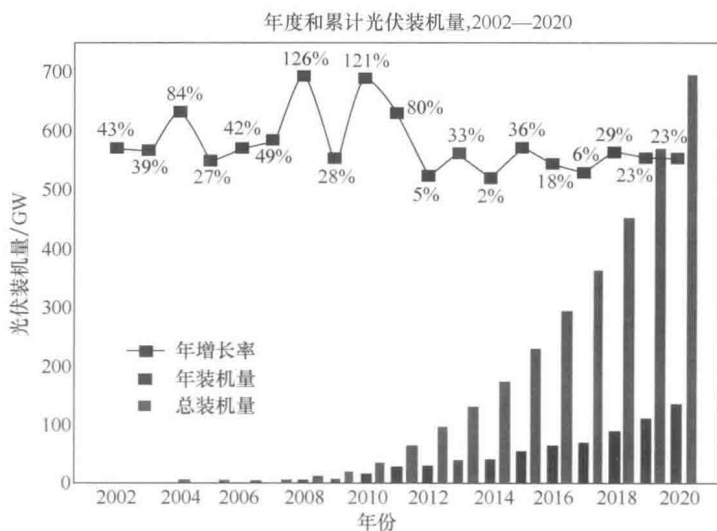


图 1.2 全球光伏装机量发展现状及趋势<sup>[3]</sup>

资料来源:绿色科技传媒研究中心



光伏发电规模的扩大和持续发展有赖于光伏材料的不断革新和技术的不断进步。太阳能电池的发展可以追溯到 1839 年,法国的 Becquerel 最早发现了液体电解液中的光电效应;然而直到 1883 年才由美国的 Fritts 使用硒制备了第一个太阳能电池;之后又经过半个世纪的发展,1930 年,Schottky 提出  $\text{Cu}_2\text{O}$  势垒的“光伏效应”理论;同年,Longer 首次提出可以利用“光伏效应”制造“太阳能电池”,使太阳能变成电能;随后,美国贝尔实验室的 Pearson 于 1954 年发明电池效率为 6% 的单晶硅太阳能电池,开启了 p-n 结太阳能电池的新时代,时至今日,p-n 结太阳能电池仍然占据着光伏领域的绝对地位。光伏材料方面,硅基材料的吸收波段与太阳光谱主要能量波段匹配,且其具有原料丰富、稳定无毒、生产成本低等特点,已经发展成为目前使用最广泛的一类太阳能电池材料。按硅材料的晶体结构,太阳能电池又可分为单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池和非晶硅太阳能电池。单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池统称为晶体硅太阳能电池,占据全球太阳能电池市场的绝大部分(市场份额约 90%),目前单晶硅太阳能电池的实验室效率已经达到 25.6%<sup>[5]</sup>。与此同时,基于不同光伏材料和不同结构的诸多类型太阳能电池不断涌现。图 1.3 为美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)对各类太阳能电池的效率追踪图<sup>[6]</sup>,每一条曲线都代表一种成熟的或具有较大发展潜力的太阳能电池技术的发展历程,每一个点都蕴含着光伏研究人员的巨大心血。其中,以 GaAs 单晶电池为代表的单结化合物太阳能电池在 117 倍聚光下的效率已经达到 29.1%<sup>[7]</sup>,有机聚合物电池实验室效率达到 11.5%<sup>[8]</sup>,染料敏化电池的效率为 11.9%<sup>[9]</sup>,量子点电池的效率近期也得到较为明显的提升,达到了 9.9%<sup>[7]</sup>。值得一提的是钙钛矿电池,其认证的效率已经达到 20.1%<sup>[10]</sup>,发展十分迅速。

随着光伏应用规模的不断扩大,太阳能电池的制造成本和系统应用成本逐渐降低。图 1.4 为 1976 年至 2014 年间,光伏组件平均售价与累积组件出货量之间的关系图<sup>[11]</sup>。由图可知,随着组件出货量的增加,光伏组件的平均价格逐渐降低。以晶体硅太阳能电池为例,在光照资源较好的地区,光伏发电成本已降至 0.10~0.11\$(/kWh),与核能和天然气发电相当,与火力发电(0.07\$(/kWh))的差距逐步缩小。光伏电力已经在日本、西班牙、德国、英国等 19 个国家和地区基本实现平价上网<sup>[11]</sup>,进入了脱离补贴也能自主发展的阶段。相比于传统化石能源,光伏发电成本的竞争优势在未来会不断地凸显出来。

长期以来,大量化石能源的消耗推动着人类工业时代的进步,但是在促进社会发展的同时,使人类赖以生存的环境遭受越来越严重的破坏,空气污染日益加剧,全球温室气体排放量持续攀升。目前的工业技术越来越注重对节能减排贡献。图 1.5 为 2014 年至 2050 年不同能源技术对  $\text{CO}_2$  减排贡献的预测情况,光伏技术在全球  $\text{CO}_2$  减排任务中将贡献 20% 的比例。2014 年,中美达成 APEC 减排协议,