

新型能源 材料与器件

云斯宁 © 主编



中國建材工业出版社

新型能源材料与器件

云斯宁 主编



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

新型能源材料与器件 / 云斯宁主编. —北京: 中国建材工业出版社, 2019. 5
ISBN 978-7-5160-2504-8

I. ①新… II. ①云… III. ①新能源—材料技术—研究 IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 025465 号

内 容 简 介

本书共分 18 章, 主要介绍了单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池、薄膜太阳能电池、有机太阳能电池、染料敏化太阳能电池、钙钛矿太阳能电池、量子点太阳能电池、质子交换膜燃料电池、固体氧化物燃料电池、半导体-离子导体燃料电池、其他类型燃料电池(熔融碳酸盐燃料电池、碱性燃料电池、磷酸燃料电池、直接甲醇燃料电池)、镍/金属氢化物电池、锂离子电池、锂硫二次电池、金属空气电池、碳基超级电容器、金属氧化物超级电容器和导电聚合物超级电容器内容。本书汇聚了新型能源材料领域最新的理论、方法和技术, 以及最新的器件化应用, 使其能够适用于教学需要。

本书可作为高等院校新能源材料与器件专业、材料科学与工程专业、功能材料专业及相关专业的研究生和本科生教材, 也可供材料领域的科研人员、管理人员参考阅读。

新型能源材料与器件

Xinxing Nengyuan Cailiao Yu Qujian

云斯宁 主编

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 27.25

字 数: 660 千字

版 次: 2019 年 5 月第 1 版

印 次: 2019 年 5 月第 1 次

定 价: 69.80 元

本社网址: www.jcbs.com, 微信公众号: zgjcgycbs

请选用正版图书, 采购、销售盗版图书属违法行为

版权专有, 盗版必究。本社法律顾问: 北京天驰君泰律师事务所, 张杰律师

举报信箱: zhangjie@tiantailaw.com 举报电话: (010) 68343948

本书如有印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换, 联系电话: (010) 88386906

前言

为了满足新能源材料与器件和功能材料等相关专业本科生和研究生的教学要求,根据2016年西安建筑科技大学对本科生和研究生课程建设的总体指导思想,由该校云斯宁教授主编,国内新能源材料领域最具影响力的专家和教授参编,《新型能源材料与器件》教材建设项目获准立项。

新能源材料日新月异,成果倍出,新理论、新技术、新方法不断涌现。本教材汇聚该领域最新的基础知识、最新的理论、最新的方法和技术及最新的器件化应用,能够适用于相关专业研究生专业基础课的课堂教学。同时,本教材依托太阳能电池、燃料电池、新型二次电池、超级电容器等,按照器件的基本原理、基本结构、构建组装、关键材料制备、生产工艺、应用领域、发展现状及展望等关键内容进行系统介绍,以满足相关专业高年级本科生专业基础课的课堂教学。

全教材共18章,主要介绍了太阳能电池(包括单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池、薄膜太阳能电池、有机太阳能电池、染料敏化太阳能电池、钙钛矿太阳能电池、量子点太阳能电池等)、燃料电池(包括质子交换膜燃料电池、固体氧化物燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、碱性燃料电池、磷酸燃料电池、直接甲醇燃料电池、半导体-离子导体燃料电池等)、新型二次电池(包括镍/金属氢化物电池、锂离子电池、锂硫二次电池、金属空气电池等)、超级电容器(包括碳基超级电容器、金属氧化物超级电容器、导电聚合物超级电容器等)等。第1章由河北英利集团宋登元和李锋编写;第2章由石家庄铁道大学王育华和晶龙实业集团有限公司闫广宁编写;第3章由西安建筑科技大学张强和管婧编写;第4章由太原理工大学郝玉英和刘成元编写;第5章由西安建筑科技大学云斯宁编写;第6章由西安交通大学杨冠军和西安石油大学李燕、周勇编写;第7章由新疆大学谢亚红编写;第8章由西安电子科技大学贾斐编写;第9章由中国地质大学(武汉)吴艳编写;第10章由湖北大学王浚英和朱斌编写;第11章由西安建筑科技大学杨春利编写;第12章由四川大学周万海、陈云贵等编写;第13章由深圳大学米宏伟和张培新编写;第14章由西安理工大学李喜飞、熊东彬、郝猷琛、范林林、田自然编写;第15章由深圳大学李永亮和张培新编写;第16章由陕西师范大学雷志斌编写;第17章由陕西师范大学刘宗怀、何学侠、李琪编写;第18章由西安交通大学孙孝飞编写。

本教材力求切合专业培养目标,满足培养体系对课程教学的要求,最大限度地反映新理论、新技术和新方法,体现学科特色或学科交叉,除作为相关专业高年级本科生和研究生的教材使用外,还可作为参考书供从事新能源材料与器件研究及开发的科研院所、企事业单位和工程技术人员使用。

本教材在编写过程中,力求内容全面,图表清晰,叙述简洁,数据准确,注重基础,适用为度。主编对全书内容进行了合理安排,各位参编人员对章节进行了仔细检查、反复

修改和认真校对。

本教材得到了西安建筑科技大学“学科特色课程教材”项目的出版资助，在此深表感谢！

本教材的编写与出版是15所高等院校及行业龙头企业共30余位作者的智慧结晶，对他们高度的责任感和一丝不苟的专业精神表示感谢！

承蒙西安建筑科技大学教务处督导组王齐铭教授、王福川教授、武维善教授（以姓氏笔画为序）对本教材全部章节进行了评阅，并提出了许多宝贵的意见，在此深表感谢！对教材所引用专著和文献的作者表示感谢！

限于编者经验不足，加之时间紧、任务重，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者和同行批评指正，我们将在第二版中予以更正。

编 者

2019年4月于西安

编写人员名单

主 编 云斯宁

编 者 (按章节排序)

- | | | |
|--------|-----|-------------|
| 第 1 章 | 宋登元 | 河北英利集团 |
| | 李 锋 | 河北英利集团 |
| 第 2 章 | 王育华 | 石家庄铁道大学 |
| | 闫广宁 | 晶龙实业集团有限公司 |
| 第 3 章 | 张 强 | 西安建筑科技大学 |
| | 管 婧 | 西安建筑科技大学 |
| 第 4 章 | 郝玉英 | 太原理工大学 |
| | 刘成元 | 太原理工大学 |
| 第 5 章 | 云斯宁 | 西安建筑科技大学 |
| 第 6 章 | 杨冠军 | 西安交通大学 |
| | 李 燕 | 西安石油大学 |
| | 周 勇 | 西安石油大学 |
| 第 7 章 | 谢亚红 | 新疆大学 |
| 第 8 章 | 贾 斐 | 西安电子科技大学 |
| 第 9 章 | 吴 艳 | 中国地质大学 (武汉) |
| 第 10 章 | 王浚英 | 湖北大学 |
| | 朱 斌 | 湖北大学 |
| 第 11 章 | 杨春利 | 西安建筑科技大学 |
| 第 12 章 | 周万海 | 四川大学 |
| | 陈云贵 | 四川大学 |

- | | | |
|--------|-----|--------|
| 第 13 章 | 米宏伟 | 深圳大学 |
| | 张培新 | 深圳大学 |
| 第 14 章 | 李喜飞 | 西安理工大学 |
| | 熊东彬 | 西安理工大学 |
| | 郝猷琛 | 西安理工大学 |
| | 范林林 | 西安理工大学 |
| | 田自然 | 西安理工大学 |
| 第 15 章 | 李永亮 | 深圳大学 |
| | 张培新 | 深圳大学 |
| 第 16 章 | 雷志斌 | 陕西师范大学 |
| 第 17 章 | 刘宗怀 | 陕西师范大学 |
| | 何学侠 | 陕西师范大学 |
| | 李 琪 | 陕西师范大学 |
| 第 18 章 | 孙孝飞 | 西安交通大学 |



中国建材工业出版社

China Building Materials Press

我们提供

图书出版

广告宣传

企业 / 个人定向出版

图文设计

编辑印刷

创意写作

会议培训

其他文化宣传

编辑部 010-88376510
出版咨询 010-68343948
市场销售 010-68001605
门市销售 010-88386906

邮箱 jccbs-zbs@163.com
网址 www.jccbs.com

发展出版传媒

传播科技进步

服务经济建设

满足社会需求

(版权专有, 盗版必究。未经出版者预先书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。举报电话: 010-68343948)

第1章 单晶硅太阳能电池

1

1.1 概述	1
1.2 单晶硅太阳能电池的工作原理	2
1.2.1 单晶硅太阳能电池的工作过程	2
1.2.2 单晶硅太阳能电池的工作原理	3
1.2.3 单晶硅太阳能电池等效电路分析	4
1.2.4 单晶硅太阳能电池的性能参数	5
1.3 单晶硅太阳能电池的制备工艺	6
1.3.1 单晶硅棒的生长	6
1.3.2 硅片加工	8
1.3.3 单晶硅太阳能电池的制备	9
1.4 高效单晶硅太阳能电池的类型	11
1.4.1 PERC 电池	11
1.4.2 PERT 电池	12
1.4.3 HJT 电池	13
1.4.4 IBC 电池	14
1.4.5 TOPCon 电池	15
1.5 单晶硅太阳能电池的发展现状及展望	16
思考题	17

第2章 多晶硅太阳能电池

19

2.1 概述	19
2.2 多晶硅原料的生产方法	19
2.2.1 Siemens 方法	19
2.2.2 ASiMi 方法	25
2.2.3 流化床法制备粒状多晶硅原料	27
2.2.4 太阳能级多晶硅的制造技术	29
2.3 多晶硅锭的铸造方法	30
2.3.1 浇铸法	31
2.3.2 布里基曼法	32
2.3.3 电磁铸造法	33

2.4	多晶硅片的制备	34
2.4.1	多晶硅片的加工成型	34
2.4.2	多晶硅片的质量控制	36
2.5	薄板多晶硅片的制备方法	37
2.5.1	EFG法	38
2.5.2	WEB法	39
2.5.3	STR法	40
2.5.4	RGS法	40
2.5.5	硅薄板的质量特性	41
2.6	多晶硅太阳能电池的发展现状及展望	41
2.6.1	多晶硅原料生产工艺的发展及展望	41
2.6.2	铸锭技术的发展现状及方向	43
2.6.3	切片技术	45
	思考题	45

第3章 薄膜太阳能电池

48

3.1	概述	48
3.2	CdTe 薄膜太阳能电池	48
3.2.1	CdTe 薄膜的基本物理特性	49
3.2.2	CdTe 薄膜太阳能电池的结构	49
3.2.3	CdTe 薄膜太阳能电池的制备技术	50
3.2.4	CdTe 薄膜太阳能电池的发展及应用现状	52
3.3	GaAs 薄膜太阳能电池	52
3.3.1	GaAs 薄膜的基本物理特性	52
3.3.2	GaAs 薄膜太阳能电池的结构	53
3.3.3	GaAs 薄膜太阳能电池的制备技术	53
3.3.4	GaAs 薄膜太阳能电池的发展及应用现状	54
3.4	CIGS 薄膜太阳能电池	55
3.4.1	CIGS 薄膜的基本物理特性	55
3.4.2	CIGS 薄膜太阳能电池的结构	56
3.4.3	CIGS 薄膜太阳能电池的制备技术	56
3.4.4	CIGS 薄膜太阳能电池的发展现状	57
3.5	CZTS 薄膜太阳能电池	58
3.5.1	CZTS 薄膜的基本物理特性	58
3.5.2	CZTS 薄膜太阳能电池的结构	59
3.5.3	CZTS 薄膜太阳能电池的制备技术	59
3.5.4	CZTS 薄膜太阳能电池的发展现状	62
3.6	InP 薄膜太阳能电池	62
3.7	多晶硅薄膜太阳能电池	64

3.8 非晶硅薄膜太阳能电池	65
思考题	67

第4章 有机太阳能电池 69

4.1 有机半导体基础知识	69
4.1.1 有机材料的能级结构	69
4.1.2 有机材料的光物理过程	72
4.1.3 激子传输与动力学过程	73
4.1.4 有机材料中载流子的传输	75
4.2 有机太阳能电池活性材料	76
4.2.1 OSCs 给体材料	76
4.2.2 OSCs 受体材料	78
4.3 有机太阳能电池的工作原理及基本结构	81
4.3.1 OSCs 的工作过程	81
4.3.2 OSCs 的基本结构	82
4.3.3 OSCs 的伏安特性	84
4.4 有机太阳能电池新结构设计	86
4.4.1 倒置 OSCs	86
4.4.2 叠层 OSCs	86
4.4.3 半透明 OSCs	88
4.4.4 基于光操控结构的 OSCs	88
4.4.5 三元共混体系 OSCs	91
4.5 有机太阳能电池的制备方法	91
4.6 有机太阳能电池的发展现状及展望	92
思考题	93

第5章 染料敏化太阳能电池 98

5.1 DSSC 的发展历史	98
5.2 DSSC 的基本结构	99
5.3 DSSC 的工作原理	99
5.4 DSSC 的表征技术	100
5.4.1 光电性能表征	101
5.4.2 电化学性能表征	103
5.4.3 光电化学性能表征	107
5.5 DSSC 光阳极	107
5.5.1 纳米晶氧化物光阳极	108
5.5.2 纳米结构光阳极	110
5.5.3 复合结构光阳极	110
5.6 DSSC 对电极	110

5.6.1	金属和合金	113
5.6.2	碳材料	113
5.6.3	过渡金属化合物	113
5.6.4	导电聚合物	114
5.6.5	复合材料	114
5.7	DSSC 电解液	114
5.7.1	碘体系电解液	114
5.7.2	非碘体系电解液	115
5.7.3	离子液体电解液	115
5.8	DSSC 染料	115
5.8.1	金属配合物染料	116
5.8.2	有机染料	116
5.9	其他类型 DSSC	117
5.9.1	准固态 DSSC	117
5.9.2	全固态 DSSC	117
5.9.3	叠层结构 DSSC	117
5.9.4	柔性 DSSC	117
5.9.5	单基板 DSSC	117
5.10	DSSC 的产业化	118
5.10.1	室内光伏	118
5.10.2	集成供电系统	118
5.10.3	光伏建筑一体化	118
	思考题	119

第 6 章 钙钛矿太阳能电池

125

6.1	钙钛矿太阳能电池的工作原理和基本结构	125
6.1.1	钙钛矿材料	125
6.1.2	钙钛矿太阳能电池的工作原理	126
6.1.3	钙钛矿太阳能电池的基本结构	128
6.2	钙钛矿薄膜的制备方法	131
6.2.1	双源气相法	131
6.2.2	两步反应法	131
6.2.3	一步溶液法	134
6.3	钙钛矿太阳能电池的其他功能层	136
6.3.1	电荷选择性吸收层	136
6.3.2	汇流传输层	139
6.4	钙钛矿太阳能电池的稳定性及封装技术	140
6.4.1	钙钛矿太阳能电池的稳定性	140
6.4.2	钙钛矿太阳能电池的封装技术	141

思考题	141
-----------	-----

第7章 量子点太阳能电池

146

7.1 概述	146
7.2 量子点基础知识	146
7.2.1 量子点的量子效应	146
7.2.2 量子点的性能特点	148
7.2.3 量子点材料	149
7.2.4 量子点的制备方法	151
7.3 量子点太阳能电池的基本类型及研究进展	152
7.3.1 肖特基结太阳能电池	154
7.3.2 耗尽型异质结太阳能电池	155
7.3.3 极薄吸收层型太阳能电池	156
7.3.4 无机-有机杂化型太阳能电池	156
7.3.5 体异质结有机聚合物太阳能电池	157
7.3.6 量子点敏化太阳能电池	158
7.4 量子点太阳能电池性能优化	161
7.4.1 体异质结结构	161
7.4.2 电极接触	161
7.4.3 表面钝化	162
7.4.4 量子点太阳能电池的稳定性	162
7.5 量子点太阳能电池的制备方法	163
7.5.1 化学浴沉积	163
7.5.2 连续离子层吸附反应法	163
7.5.3 具有分子链接的单分散量子点	164
7.5.4 直接吸附	164
7.6 量子点太阳能电池的展望	164
思考题	164

第8章 质子交换膜燃料电池

167

8.1 质子交换膜燃料电池概述及应用	167
8.1.1 PEMFC 结构	167
8.1.2 PEMFC 的工作原理及特性	168
8.1.3 PEMFC 的应用及发展	171
8.2 质子交换膜燃料电池的电解质材料	173
8.2.1 全氟磺酸质子交换膜	173
8.2.2 非氟化质子交换膜	174
8.2.3 质子交换膜的性能及影响因素	175
8.3 质子交换膜燃料电池的电极材料	176

8.3.1	电催化剂	176
8.3.2	扩散层	178
8.3.3	电极的制备与表征	178
8.4	质子交换膜燃料电池的双极板与流场	181
8.4.1	金属双极板	181
8.4.2	石墨双极板	182
8.4.3	流场结构	183
8.5	质子交换膜燃料电池技术	185
8.5.1	PEMFC 水管理	185
8.5.2	PEMFC 热管理	186
	思考题	187

第9章 固体氧化物燃料电池

194

9.1	概述	194
9.1.1	工作原理	194
9.1.2	发展简史	195
9.1.3	特点与用途	196
9.2	固体氧化物燃料电池的电解质材料	197
9.2.1	氧离子导体	197
9.2.2	质子导体	199
9.2.3	复合电解质	200
9.3	固体氧化物燃料电池的电极材料	201
9.3.1	阳极材料	201
9.3.2	阴极材料	203
	思考题	206

第10章 半导体-离子导体燃料电池

213

10.1	概述	213
10.1.1	发展历史	213
10.1.2	工作原理	216
10.2	半导体-离子导体燃料电池的关键材料	219
10.2.1	半导体-离子导体复合材料	219
10.2.2	电极材料	220
10.3	影响半导体-离子导体燃料电池性能和寿命的主要因素	222
10.3.1	温度的影响	222
10.3.2	压力的影响	223
10.3.3	电池制备工艺的影响	223
10.4	半导体-离子导体燃料电池的展望	224
	思考题	224

11.1 熔融碳酸盐燃料电池	230
11.1.1 概述	230
11.1.2 原理和结构	230
11.1.3 阳极材料	231
11.1.4 阴极材料	232
11.1.5 电池隔膜	233
11.1.6 熔融碳酸盐燃料电池导电双极板	236
11.2 碱性燃料电池	237
11.2.1 概述	237
11.2.2 原理和结构	237
11.2.3 阳极催化剂	238
11.2.4 碱性燃料电池阴极催化剂	239
11.3 磷酸燃料电池	240
11.3.1 概述	240
11.3.2 原理和结构	240
11.3.3 阳极催化剂	241
11.3.4 阴极催化剂	241
11.4 直接甲醇燃料电池	242
11.4.1 概述	242
11.4.2 原理和结构	242
11.4.3 阳极材料	243
11.4.4 阴极材料	244
11.4.5 聚合物膜材料	245
11.5 其他类型燃料电池的发展现状及展望	245
11.5.1 熔融碳酸盐燃料电池	245
11.5.2 碱性燃料电池	246
11.5.3 磷酸燃料电池	247
11.5.4 直接甲醇燃料电池	248
思考题	249

12.1 Ni/MH 电池简介	252
12.1.1 工作原理	252
12.1.2 结构类型	254
12.1.3 化学体系	254
12.2 氢氧化镍正极材料	255
12.2.1 镍电极充放电机理	255

12.2.2	氢氧化镍的结构及晶型之间的转化	257
12.2.3	高密度球形 β -Ni(OH) ₂ 的制备与改性	259
12.3	金属氢化物负极材料	261
12.3.1	贮氢合金的热力学基础	261
12.3.2	MH 电极反应与电极过程动力学	262
12.3.3	贮氢合金电极材料	264
12.3.4	贮氢合金的制备技术	266
12.4	Ni/MH 电池的制造工艺	267
12.4.1	正、负极制造技术	267
12.4.2	Ni/MH 电池的装配与分容化成	268
12.4.3	Ni/MH 电池组	269
12.5	Ni/MH 电池的特性	270
12.5.1	充电特性与充电方法	270
12.5.2	放电特性	271
12.5.3	温度特性	272
12.5.4	循环寿命与自放电	273
12.5.5	电绝缘	273
12.6	Ni/MH 电池的应用	274
12.6.1	在电子消费类市场上的应用	274
12.6.2	在混合动力汽车上的应用	275
12.6.3	燃料电池的动力辅助	276
12.6.4	其他	276
12.7	Ni/MH 电池的发展趋势	276
12.7.1	降低成本	277
12.7.2	高比能量设计	277
12.7.3	超高功率设计	277
	思考题	278

第 13 章 锂离子电池

280

13.1	概述	280
13.2	锂离子电池的工作原理、结构和性能	280
13.2.1	工作原理	280
13.2.2	结构	281
13.2.3	性能	283
13.3	锂离子电池正极材料	284
13.3.1	磷酸铁锂 (LiFePO ₄)	285
13.3.2	钴酸锂	287
13.3.3	锰酸锂	287
13.3.4	三元材料	289

13.4	锂离子电池负极材料	290
13.4.1	碳材料	291
13.4.2	硅	292
13.4.3	锡	293
13.4.4	金属氧化物	294
13.4.5	其他材料	294
13.5	锂离子电池的电解质	295
13.5.1	液体电解质	295
13.5.2	固体电解质	296
13.6	锂离子电池的机遇与挑战	298
	思考题	298

第14章 锂硫二次电池

301

14.1	锂硫二次电池概述	301
14.2	锂硫二次电池的基本原理和特点	301
14.3	锂硫电池面临的问题	302
14.4	锂硫二次电池的性能评价	303
14.5	锂硫二次电池的硫正极	304
14.5.1	硫正极的工作原理	304
14.5.2	硫正极的容量损失及衰减机理	304
14.5.3	硫正极的改性	305
14.5.4	硫正极的胶黏剂	307
14.5.5	硫正极的发展趋势	308
14.6	金属锂负极	308
14.6.1	锂负极与电解质界面	309
14.6.2	锂负极面临的问题	310
14.6.3	锂负极的改性	311
14.6.4	锂负极的发展趋势	312
14.7	锂硫二次电池的电解质	312
14.7.1	概述	312
14.7.2	有机液体电解质	313
14.7.3	固态电解质	314
14.7.4	离子液体和添加剂	315
14.8	锂硫二次电池隔膜	316
14.8.1	概述	316
14.8.2	功能性隔膜	316
14.8.3	锂硫二次电池隔膜的发展趋势	317
14.9	新型锂硫二次电池	317
14.9.1	全固态锂硫二次电池	317