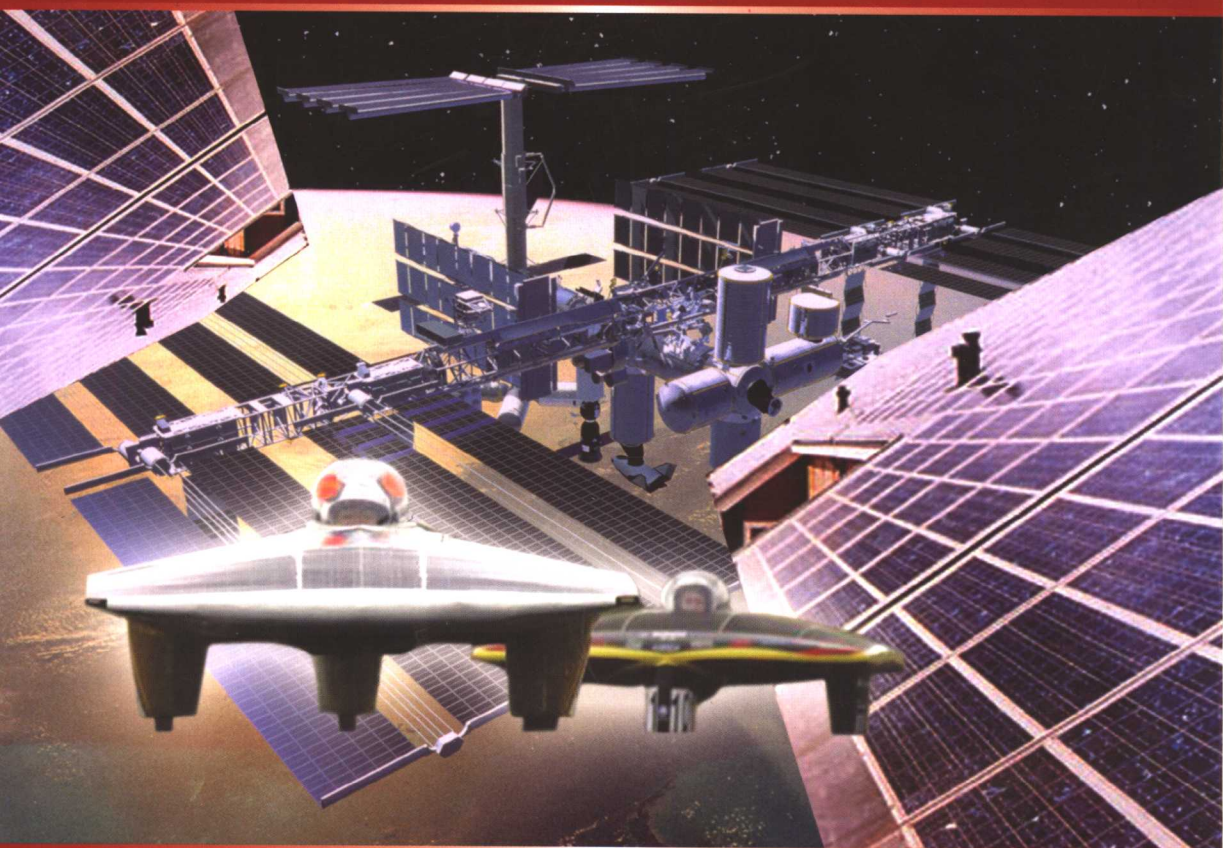


电 池 材 料 与 应 用 系 列

太阳电池材料

杨德仁 编著

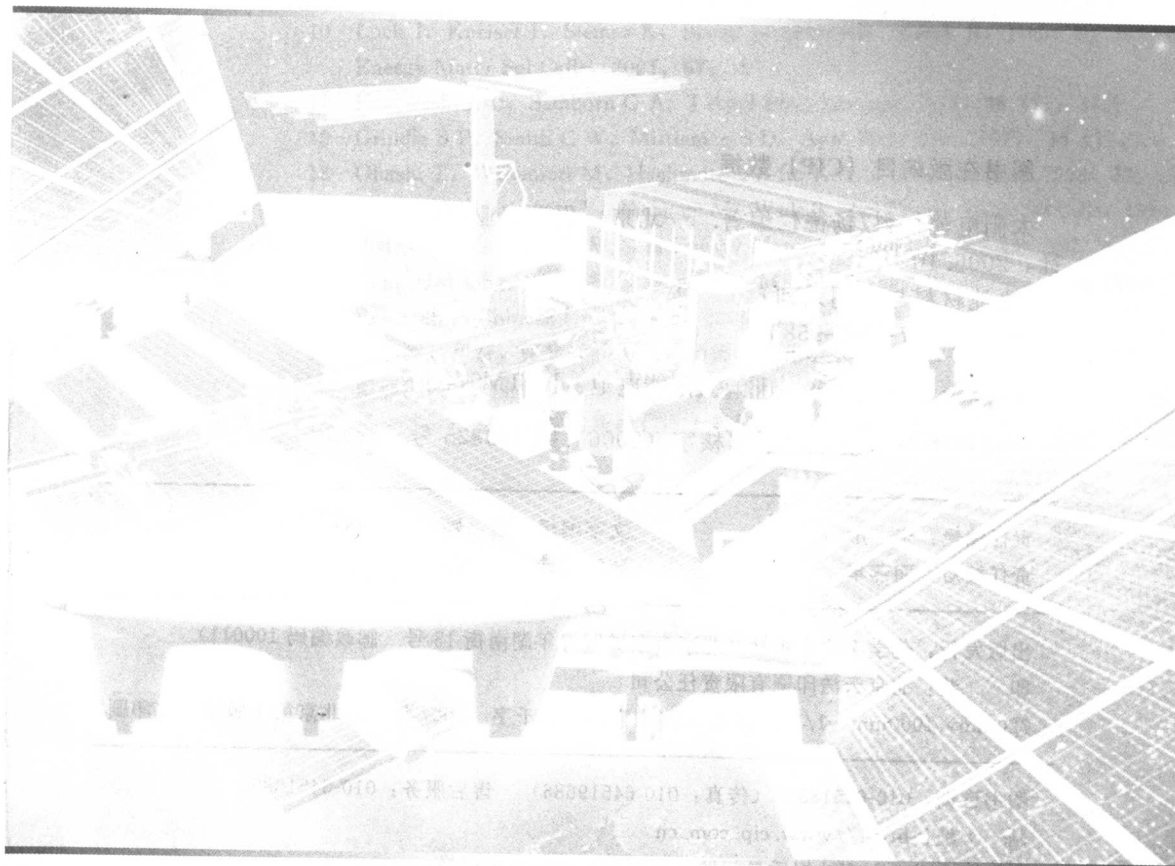


化学工业出版社

电 池 材 料 与 应 用 系 列

太阳电池材料

杨德仁 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

太阳能是一种重要的、新的、有效的可再生清洁能源，其储量巨大，没有环境污染，充满了诱人的前景。目前太阳能光电方面的研究和应用在全世界范围内方兴未艾，相关太阳能光电工业发展迅速，是令人瞩目的朝阳产业。

本书介绍了太阳能及光电转换的基本原理、太阳电池的基本结构和工艺，着重从材料制备和性能的角度出发，阐述了主要的太阳能光电材料的基本制备原理、制备技术以及材料结构、组成对太阳电池的影响。太阳能光电材料包括直拉单晶硅、铸造多晶硅、带硅、非晶硅、多晶硅、GaAs、CdTe 和 CuInSe₂ (CuInS₂)。

本书可供大专院校的半导体材料与器件、材料科学与工程以及太阳能光伏等能源领域的师生作为教学参考书，也可供从事相关研究和开发的太阳能相关行业科技工作者和企业工程师作为参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳电池材料/杨德仁编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 10

(电池材料与应用系列)

ISBN 978-7-5025-9580-7

I. 太… II. 杨… III. 太阳电池 IV. TM914. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 129325 号

责任编辑: 朱 彤

文字编辑: 贾 婷

责任校对: 陶燕华

装帧设计: 潘 峰

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京云浩印刷有限责任公司

720mm×1000mm 1/16 印张 20 3/4 字数 388 千字 2007 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 39.80 元

版权所有 违者必究

序

人类进入 21 世纪，对能源的需求不断增加，中国经济的腾飞又对能源提出了更多需求。能源，作为国民经济、国家科技发展的发动机，引起了全世界的关注。特别是近两年来，国际石油价格飞涨，更是引起了各国政府、有识人士，甚至普通老百姓对能源的关心。因此，清洁的可再生能源的研究和开发是国际学术界关注的重点。

太阳能是人类最重要的无污染、可再生、无穷无尽的新能源，因此，太阳能的研究和应用是今后人类能源发展的主要方向之一。早在 20 世纪 50 年代，第一块硅太阳电池的问世，揭开了现代太阳电池研究和开发的序幕。太阳电池的应用从太空卫星，到偏僻地区的独立电源，到大规模光伏电厂，再到屋顶太阳电池的并网发电，应用领域不断扩展；太阳电池的产量从 20 世纪 80 年代的数十兆瓦，到 2005 年的 1800MW，规模不断增加，而且价格不断降低。因此，太阳电池产业发展迅速，成为世界上备受关注的新兴的朝阳产业。

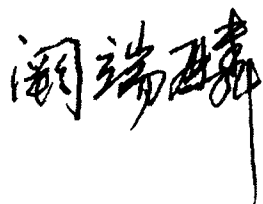
在过去的 50 年中，不仅太阳电池的产业，相关的科学和技术也得到了很大发展。一方面，硅太阳能光电池的效率不断提高，在实验室中达到 25% 左右，逐渐接近理论值；另一方面不断有新的高性能半导体材料被用于太阳能光电材料。除薄膜硅晶体、铸造多晶硅、带硅等新型硅材料以外，许多化合物半导体材料甚至有机材料都被应用于制备太阳电池。太阳电池材料的研究和开发为太阳电池效率的提高、产业的发展提供了重要基础。

本书从材料制备和性能的角度出发，着重介绍了应用于太阳电池的主要材料的基本性能、制备原理和制备技术，还介绍了太阳电池材料的结构、组成以及对太阳电池性能的可能影响，并介绍了相关材料研究的新概念、新技术和研究前沿。本书的材料体系齐全，视野独特，既包括直拉单晶硅、铸造多晶硅、带硅、非晶硅薄膜、多晶硅薄膜等硅材料，又包括 GaAs、CdTe 和 CuInSe_2 (CuInS_2) 化合物半导体材料。本书可以为太阳能光电材料研究的科研人员、工程技术人员和学生以及太阳电池制备领域的相关人员提供很好的参考资料。

目前，我国太阳电池的研究和产业方兴未艾，蓬勃发展，对相关著作多有需

求。虽然太阳电池方面的专著已有一些，但是专门介绍太阳电池材料的著述尚不多见。相信本书的出版会对我国太阳电池材料和太阳电池的科研、产业和人才培养起到一定的积极作用。

中国科学院院士

A handwritten signature in black ink, appearing to read '阎端' (Yan Duan), with a long vertical stroke extending downwards from the right side.

2006年6月16日

前 言

太阳能是一种重要的、有效的、可再生清洁能源，其储量巨大，取之不尽，用之不竭，没有环境污染，充满了诱人的前景。广义上讲，太阳能的利用包括间接利用和直接利用。间接利用是指光合作用、风能、潮汐和海洋温差发电等；而直接利用则主要分为两方面，即光热效应和光电效应。光热效应是将太阳能的能量集聚起来，转换成热能，如正在我国城乡广泛推广的太阳能热水器、太阳能灶等，这也包括将太阳能转换成热能后，利用热能发电。光电效应则是将太阳能通过太阳电池，转换成电能，这种光电转换主要借助于半导体器件的光生伏特效应进行，应用于空间站、人造卫星以及遥远地区的供电、输油输气管路的保护等方面，并且已经建成太阳能电站以并网发电。

自1954年美国贝尔实验室研制成功光电转换效率6%的实用型单晶硅太阳电池以来，太阳能光电技术由于可靠性高、寿命长且能承受各种环境变化等优点，在民用、军事和高科技领域逐渐成为重要的“绿色”能源。特别是20世纪70年代能源危机爆发以来，各国政府努力发展和扶持太阳能光电材料的研究、开发、生产和应用，如美国的“阳光计划”、“百万屋顶计划”，日本的“阳光计划”、“月光计划”、“朝日计划”以及德国的“十万屋顶计划”等。目前太阳能光电方面的研究和应用在全世界范围内方兴未艾，相关的太阳能光电工业，又称光伏（photovoltaic）工业发展迅速，90年代以来一直以30%~40%的速度上升，在2004年甚至达到60%的增长速度，成为非常令人瞩目的朝阳产业。

太阳能光电转换的研究和应用可追溯到1839年。A. E. Becquerel用光辐照电解池中的银电极时，发现有电压出现。1877年，W. Adams和R. Day也发现，用光照射硒时会有电流产生。直到1949年，W. Shockley等发明了晶体管 and 解释了p-n结的工作原理后，太阳能光电转换的研究才真正开始。1954年美国贝尔实验室的D. M. Chapin、C. S. Fuller和G. L. Pearson在晶体硅的基础上发明了第一种实际意义上的太阳电池，其光电转换效率达到了6%。随后的研究进展迅速，太阳电池的光电转换效率很快达到10%。太阳电池首先应用于空间领域，为人造卫星提供电力能源。

目前，太阳能光电研究和应用取得了许多重大进展，例如，与单晶硅材料相比，价格低廉的利用铸造方法制备的铸造多晶硅材料的应用、带状多晶硅材料的生产、低成本的丝网印刷等技术的发明都大大推动了太阳能光电技术的研究和进

展。目前,单晶硅太阳能电池产业化转换效率已超过 16%,实验室转换效率超过 24%。

高的光电转换效率和低的生产成本是太阳能光电工业和研究界始终追求的目标,这也是太阳能发电能否与其他能源技术相竞争的关键问题。显然,为了达到这个目的,利用高效率、低成本的太阳能光电转换材料是非常重要的。到目前为止,在太阳能光电工业中应用的主要有直拉单晶硅、铸造多晶硅、带硅、非晶硅、多晶硅和化合物薄膜半导体材料(如 GaAs、CdTe、CuInSe₂)。从根本上讲,太阳能光电工业主要是建立在硅材料基础之上。

到目前为止,介绍太阳电池的专著已有多种。但是,专门从材料制备、材料结构和性能角度出发介绍太阳能光电材料的专著还较少。本书正是试图在介绍太阳能光电转化基本原理和太阳电池基本结构和工艺的基础上,重点介绍太阳能光电材料的制备、材料的结构和性能。本书分为三大部分。第一部分是太阳能光电转换的基础知识,包括第 1 章太阳能和光电转换;第 2 章太阳能光电材料及物理基础;第 3 章太阳电池的结构和制备。第二部分是硅太阳电池材料,包括第 4 章单晶硅材料;第 5 章直拉单晶硅中的杂质和位错;第 6 章铸造多晶硅;第 7 章铸造多晶硅中的杂质和缺陷;第 8 章带硅材料;第 9 章非晶硅薄膜和第 10 章多晶硅薄膜。第三部分是化合物太阳电池材料,包括第 11 章 GaAs 半导体材料;第 12 章 CdTe 和 CdS 薄膜材料;第 13 章 CuInSe₂ (CuInS₂) 薄膜材料。

在本书的撰写过程中,马向阳教授审阅了第 2、4、5 章的内容,席珍强博士审阅了第 3、6、7、8 章的内容,寥显伯教授、向贤碧教授审阅了第 9、10、11 章的内容,孙云教授、李长健教授审阅了第 12、13 章的内容,冯良桓教授审阅了第 12 章的内容。他们花费了很多时间,并提出了大量宝贵意见,使本书减少了许多可能的错误,作者在此表示衷心的感谢。

另外,编者的博士研究生李红、谢荣国、崔灿、黄国银、杨青、汤会香、张辉等,帮助编者收集了大量资料,付出了辛勤劳动,在此一并表示感谢。

太阳能光电材料体系较多,发展迅速。由于作者的知识面和水平有限,书中肯定会存在一些疏漏,恳请读者批评指正。

编者

2006 年 10 月

目 录

第 1 章 太阳能和光电转换	1
1.1 太阳能	1
1.2 太阳能辐射和吸收	3
1.3 太阳能光电的研究和应用历史	4
1.4 太阳电池的研究和开发	7
参考文献	10
第 2 章 太阳能光电材料及物理基础	12
2.1 半导体材料和太阳能光电材料	12
2.1.1 半导体材料	12
2.1.2 太阳能光电材料	14
2.2 载流子和能带	14
2.2.1 载流子	14
2.2.2 能带结构	15
2.2.3 电子和空穴	19
2.3 杂质和缺陷能级	20
2.3.1 杂质半导体	20
2.3.2 杂质能级	22
2.3.3 深能级	23
2.3.4 缺陷能级	24
2.4 热平衡下的载流子	25
2.4.1 载流子的状态密度和统计分布	26
2.4.2 本征半导体的载流子浓度	29
2.4.3 杂质半导体的载流子浓度和补偿	30
2.5 非平衡少数载流子	32
2.5.1 非平衡载流子的产生、复合和寿命	33
2.5.2 非平衡载流子的扩散	35
2.5.3 非平衡载流子在电场下的漂移和扩散	36
2.6 p-n 结	38
2.6.1 p-n 结的制备	39

2.6.2	p-n 结的能带结构	41
2.6.3	p-n 结的电流电压特性	43
2.7	金属-半导体接触和 MIS 结构	45
2.7.1	金属-半导体接触	45
2.7.2	欧姆接触	47
2.7.3	MIS 结构	48
2.8	太阳能光电转换原理——光生伏特效应	49
2.8.1	半导体材料的光吸收	49
2.8.2	光生伏特	51
	参考文献	53
第 3 章	太阳电池的结构和制备	54
3.1	太阳电池的结构和光电转换效率	54
3.2	晶体硅太阳电池的基本工艺	57
3.2.1	绒面结构	57
3.2.2	p-n 结制备	59
3.2.3	铝背场	60
3.2.4	金属电极	61
3.2.5	减反射层	61
3.3	薄膜太阳电池	63
3.3.1	砷化镓薄膜太阳电池	63
3.3.2	非晶硅薄膜太阳电池	65
3.3.3	多晶硅薄膜太阳电池	68
3.3.4	CdTe 薄膜太阳电池	69
3.3.5	CuInSe ₂ 薄膜太阳电池	71
	参考文献	73
第 4 章	单晶硅材料	75
4.1	硅的基本性质	75
4.2	太阳电池用硅材料	78
4.3	高纯多晶硅的制备	80
4.3.1	三氯氢硅氢还原法	81
4.3.2	硅烷热分解法	81
4.3.3	四氯化硅氢还原法	82
4.4	太阳能级多晶硅的制备	82
4.5	区熔单晶硅	85
4.6	直拉单晶硅	87

4.6.1	直拉单晶硅的生长原理和工艺	87
4.6.2	新型直拉晶体硅的生长技术	90
4.6.3	直拉单晶硅的掺杂	94
4.7	硅晶片加工	98
4.7.1	切断	99
4.7.2	滚圆	99
4.7.3	切片	99
4.7.4	化学腐蚀	102
	参考文献	102
第5章	直拉单晶硅中的杂质和位错	104
5.1	直拉单晶硅中的氧	105
5.1.1	氧的基本性质	105
5.1.2	氧热施主	108
5.1.3	氧沉淀	110
5.1.4	硼氧复合体	116
5.2	直拉单晶硅中的碳	120
5.2.1	碳的基本性质	121
5.2.2	碳和氧沉淀	122
5.3	直拉单晶硅中的金属杂质	124
5.3.1	金属杂质的基本性质	125
5.3.2	金属复合体和沉淀	130
5.3.3	金属杂质的控制	131
5.4	直拉单晶硅中的位错	133
5.4.1	位错的基本性质	133
5.4.2	晶体硅中的位错结构	137
5.4.3	晶体硅中位错的腐蚀和表征	138
5.4.4	晶体硅中位错对太阳能电池的影响	140
	参考文献	141
第6章	铸造多晶硅	143
6.1	概述	143
6.2	铸造多晶硅的制备工艺	145
6.3	铸造多晶硅的晶体生长	149
6.3.1	铸造多晶硅的原材料	149
6.3.2	坩埚	149
6.3.3	晶体生长工艺	149

6.3.4	晶体生长的影响因素	151
6.3.5	晶体掺杂	154
	参考文献	155
第7章	铸造多晶硅中的杂质和缺陷	156
7.1	铸造多晶硅中的氧	156
7.1.1	原生铸造多晶硅中的氧杂质	156
7.1.2	原生铸造多晶硅中的氧施主和氧沉淀	158
7.1.3	铸造多晶硅中氧的热处理性质	160
7.2	铸造多晶硅中的碳	163
7.2.1	原生铸造多晶硅中的碳杂质	163
7.2.2	铸造多晶硅中碳的热处理性质	164
7.3	铸造多晶硅中的氮	167
7.3.1	铸造多晶硅中的氮杂质	167
7.3.2	铸造多晶硅中的氮氧复合体	170
7.3.3	铸造多晶硅中的氮对氧沉淀、氧施主的作用	171
7.4	铸造多晶硅中的氢	172
7.4.1	铸造多晶硅中的氢杂质	172
7.4.2	铸造多晶硅中氢的钝化作用	174
7.5	铸造多晶硅中的金属杂质和吸杂	175
7.5.1	铸造多晶硅中的金属杂质	175
7.5.2	铸造多晶硅中的金属沉淀	176
7.5.3	铸造多晶硅的吸杂	177
7.6	铸造多晶硅中的晶界	182
7.6.1	铸造多晶硅的晶界	182
7.6.2	铸造多晶硅晶界上的金属沉淀	185
7.6.3	铸造多晶硅晶界的氢钝化	187
7.7	铸造多晶硅中的位错	188
7.7.1	铸造多晶硅的位错	188
7.7.2	铸造多晶硅的位错对电学性能的影响	190
	参考文献	191
第8章	带硅材料	192
8.1	带硅材料的制备	192
8.1.1	边缘限制薄膜带硅生长技术	193
8.1.2	线牵引带硅生长技术	194
8.1.3	枝网带硅工艺	195

8.1.4	衬底上的带硅生长技术	196
8.1.5	工艺粉末带硅生长技术	198
8.2	带硅生长的基本问题	199
8.2.1	边缘稳定性	199
8.2.2	应力控制	199
8.2.3	产率	199
8.3	带硅材料的缺陷和杂质	201
8.3.1	带硅材料的晶界	201
8.3.2	带硅材料的位错	201
8.3.3	带硅材料的杂质	202
8.4	带硅材料的氢钝化和吸杂	203
8.4.1	带硅材料的氢钝化	203
8.4.2	带硅材料的吸杂	204
	参考文献	205
第9章	非晶硅薄膜	206
9.1	非晶硅薄膜的基本性质	208
9.1.1	非晶硅的原子结构特征	208
9.1.2	非晶硅的能带结构	208
9.1.3	非晶硅的基本特性	211
9.2	等离子体化学气相沉积制备非晶硅薄膜	212
9.2.1	辉光放电的基本原理	213
9.2.2	等离子增强化学气相沉积制备非晶硅薄膜	214
9.2.3	非晶硅薄膜的生长	215
9.2.4	非晶硅薄膜的生长机理	217
9.3	非晶硅薄膜的掺杂	220
9.3.1	非晶硅的掺杂	220
9.3.2	非晶硅薄膜中的杂质	221
9.4	非晶硅薄膜中的氢	223
9.4.1	硅氢键	223
9.4.2	非晶硅中氢的态密度	224
9.5	非晶硅薄膜中的光致衰减	226
9.5.1	非晶硅薄膜的光致衰减效应	226
9.5.2	非晶硅薄膜光致衰减效应的影响因素	228
9.5.3	非晶硅薄膜光致衰减效应的减少和消除	229
9.6	非晶硅合金薄膜	231
9.6.1	非晶硅碳合金薄膜	232

9.6.2 非晶硅锗合金薄膜	233
参考文献	234
第 10 章 多晶硅薄膜	235
10.1 多晶硅薄膜的基本性质	236
10.1.1 多晶硅薄膜的特点	236
10.1.2 多晶硅薄膜的制备技术	237
10.1.3 多晶硅薄膜的晶界和缺陷	239
10.1.4 多晶硅薄膜的杂质	241
10.2 化学气相沉积制备多晶硅薄膜	242
10.2.1 等离子增强化学气相沉积制备多晶硅薄膜	242
10.2.2 低压化学气相沉积制备多晶硅薄膜	245
10.2.3 热丝化学气相沉积制备多晶硅薄膜	246
10.3 非晶硅晶化制备多晶硅薄膜	249
10.3.1 固化晶化制备多晶硅薄膜	250
10.3.2 金属诱导固化晶化制备多晶硅薄膜	251
10.3.3 快速热处理晶化制备多晶硅薄膜	253
10.3.4 激光晶化制备多晶硅薄膜	257
参考文献	258
第 11 章 GaAs 半导体材料	259
11.1 GaAs 材料的性质和太阳电池	259
11.1.1 GaAs 的基本性质	259
11.1.2 GaAs 太阳电池	262
11.2 GaAs 体单晶材料	264
11.2.1 布里奇曼法制备 GaAs 单晶	265
11.2.2 液封直拉法制备 GaAs 单晶	266
11.3 GaAs 薄膜单晶材料	267
11.3.1 液相外延制备 GaAs 薄膜单晶	268
11.3.2 金属-有机化学气相沉积外延制备 GaAs 薄膜单晶	269
11.3.3 Si、Ge 衬底上外延制备 GaAs 薄膜材料	272
11.4 GaAs 晶体中的杂质	274
11.4.1 GaAs 单晶掺杂	274
11.4.2 GaAs 单晶中的杂质	276
11.5 GaAs 晶体中的缺陷	278
11.5.1 GaAs 单晶中的点缺陷	278
11.5.2 GaAs 单晶中的位错	279

11.5.3 GaAs 单晶中缺陷的氢钝化	279
参考文献	280
第 12 章 CdTe 和 CdS 薄膜材料	282
12.1 CdTe 材料和太阳电池	283
12.1.1 CdTe 薄膜材料的基本性质	283
12.1.2 CdTe 薄膜太阳电池	284
12.2 CdTe 薄膜材料的制备	285
12.2.1 近空间升华法	285
12.2.2 电化学沉积法	289
12.2.3 制备 CdTe 薄膜的其他技术	292
12.2.4 CdTe 薄膜材料的热处理	293
12.3 CdS 薄膜材料	294
12.3.1 CdS 薄膜材料的基本性质	294
12.3.2 CdS 薄膜材料的制备	295
12.3.3 CdS 薄膜材料的热处理	299
12.3.4 CdS 薄膜材料的缺陷	300
参考文献	301
第 13 章 CuInSe₂(CuInS₂) 薄膜材料	303
13.1 CuInSe ₂ (CuIn _x Ga _{1-x} Se ₂) 材料和太阳电池	303
13.1.1 CuInSe ₂ (CuIn _x Ga _{1-x} Se ₂) 材料的基本性质	303
13.1.2 CuInSe ₂ (CuIn _x Ga _{1-x} Se ₂) 薄膜太阳电池	305
13.2 CuInSe ₂ (CuInGaSe ₂) 薄膜材料的制备	306
13.2.1 硒化法制备 CuInSe ₂ 薄膜材料	306
13.2.2 共蒸发法制备 CuInSe ₂ 薄膜材料	307
13.2.3 CuInGaSe ₂ 薄膜材料的制备	308
13.3 CuInS ₂ 材料的性质和太阳电池	311
13.3.1 CuInS ₂ 材料的基本性质	311
13.3.2 CuInS ₂ 太阳电池	313
13.4 CuInS ₂ 薄膜材料的制备	313
13.4.1 硫化法制备 CuInS ₂ 薄膜材料	314
13.4.2 溅射沉积法制备 CuInS ₂ 薄膜材料	314
13.4.3 化学水浴法制备 CuInS ₂ 薄膜材料	315
参考文献	317

第 1 章

太阳能和光电转换

对于人类而言，太阳是非常重要的一颗恒星，为人类提供光和热。太阳高温、高压，蕴藏着巨大能量，不断地通过光线向宇宙放射，太阳能是人类重要的无污染新型能源。当太阳光线到达地球时，一小部分被大气吸收，绝大部分可以直接照射到地球的表面。地球的自转、季节、气候条件和大气层成分等因素，都对地球上接收到的太阳能产生影响，也就是说在地球上不同地区受到的光照是不同的，我国的西藏自治区是地球上太阳能最丰富的地区之一。

人类利用太阳能有多种方式，包括光化学转化、太阳能光热转化和太阳能光电转化，其中太阳能光电转化是将太阳能转化成电能。早在 19 世纪，人类就认识到光照射在半导体材料上，可以产生电流。20 世纪 50 年代，第一块硅太阳能电池的问世，揭开了现代太阳能光电转化研究和开发的序幕。随着研究的深入，一方面不断有新的高性能的半导体材料被用于太阳能光电材料；另一方面，硅太阳能电池的效率不断提高，在实验室中达到 25% 左右。目前，铸造多晶硅、直拉单晶硅、薄膜非晶硅成为最重要的太阳能光电材料，而薄膜多晶硅、薄膜化合物太阳能光电材料又是人们研究和开发的希望。由于能源危机，太阳能光电的研究和应用得到了各国政府的支持。在过去的 30 年中，设立和启动了各种太阳能光电计划，促使太阳能光电产业（即光伏产业）的快速发展，使之成为新兴的朝阳产业。

本章首先讨论太阳和太阳能的基本性质，阐述太阳光的反射、散射和吸收，太阳能的辐射、吸收以及大气质量等概念，然后讨论太阳能应用的分类、历史和进展以及国际上的太阳能研究和应用项目，最后介绍太阳能光电池和材料的研究及开发，特别是硅太阳电池和化合物太阳电池的发展。

1.1 太阳能

太阳是距离地球最近的恒星，直径约 $1.39 \times 10^6 \text{ km}$ ，是地球的 109 倍，而它的体积和质量分别是地球的 130 万倍和 33 万倍。它是由炽热气体构成的一个巨大球体，中心温度约为 10^7 K ，表面温度接近 5800K，主要由氢和氦组成，其中氢占 80%，氦占 19%。

太阳内部处于高温、高压状态，不停地进行着热核反应，由氢聚变成氦。据测算，每秒约有 $6 \times 10^{11} \text{ kg}$ 的氢转变成氦，净质量亏损约为 $4 \times 10^3 \text{ kg}$ 。根据爱因斯坦相对论，通过热核反应，质量可以转化为能量，其公式为

$$E = mc^2 \quad (1.1)$$

式中， m 为物质的质量； c 为真空中的光速 ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)。在进行热核反应时，生成大量的能量，由式 (1.1) 可知， 1 g 物质约可转化为 $9 \times 10^3 \text{ J}$ 的能量。

巨大的能量不断从太阳向宇宙辐射，达到 $3.6 \times 10^{20} \text{ MW/s}$ ，其中约 22 亿分之一辐射到地球上，经过大气层的反射、散射和吸收，约有 70% 的能量辐射到地面。尽管太阳能只有很少的一部分辐射到地面，但数量仍然是巨大的，每年辐射到地球表面的太阳能能量约为 $1.8 \times 10^{18} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，等于 1.3×10^6 亿吨标准煤，是地球年耗费能量的几万倍^[1]。按照目前太阳质量损耗的速率，太阳的热核反应可进行 6×10^{10} 年。对于人类的短暂历史而言，太阳能是“取之不尽，用之不竭”的清洁能源。

地球绕太阳公转的轨道呈椭圆形，离太阳的最远距离和最近距离分别为 $1.52 \times 10^8 \text{ km}$ 和 $1.47 \times 10^8 \text{ km}$ ，平均距离为 $1.49 \times 10^8 \text{ km}$ 。由于距离的变化，夏天 6 月份（距离太阳最远）地面接受的平均能量为 12 月份（距离太阳最近）的 94%，差别不是很大，可以认为太阳在大气层外的辐射强度是不变的。但是除了由于地球围绕太阳公转的原因之外，地球的自转、气候条件（如云层厚度）和大气层成分等都能对辐射到地球表面的太阳能能量产生影响，因此，在具体某个地区的地面接受到的太阳能在不同的季节和不同的气候条件下是不同的。通常，太阳能资源的丰度用全年辐射总量 [单位为 $\text{kcal}^\bullet/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 或 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$] 和全年日照总时数来表示，它的分布和各地的纬度、海拔高度、地理和气候条件紧密相关。就全球而言，以非洲、澳大利亚、中东、中国西藏和美国西南部的太阳能资源最为丰富。

一般而言，太阳能的辐射强度可以用式 (1.2) 表达^[2]

$$P = I(\varphi) \cos \varphi \quad (1.2)$$

一日内的总辐射量为

$$TSI = 2 \int^{D/2} I(\varphi) \cos \varphi'' dt \quad (1.3)$$

式中， I 为太阳光入射能量； φ 为太阳光相对天顶的入射角； φ'' 为太阳光与光线接收器法线的夹角，即 $\varphi'' = \varphi - \alpha$ ； α 为光线接收器与地面的倾角； D 为日照时间； t 为时间。

就我国而言，2/3 的地区太阳能辐射总量大于 $5024 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，年日照时

[●] $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$ ，全书同。

数在 2000h 以上, 太阳能资源十分丰富。其中西藏、青海、新疆、甘肃、宁夏、内蒙古的辐射总量和日照时数在我国位居前列。除了四川盆地和毗邻地区以外, 我国绝大部分地区的太阳能资源超过或相当于国外同纬度地区, 优于欧洲和日本。由于南面是海拔约 7000~8850m 的喜马拉雅山脉, 阻挡着印度洋的水蒸气, 因此青藏高原的太阳能辐射总量达 $6670 \sim 8374 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 年日照时数达 3200~3300h, 是我国太阳能资源最好的地区。而四川盆地云雨天气多, 是太阳能资源相对较差的地区^[1,3]。

1.2 太阳能辐射和吸收

当太阳光照射到地球时, 一部分光线被反射或散射, 一部分光线被吸收, 只有约 70% 的光线能透过大气层, 以直射光或散射光到达地球表面。到达地球表面的太阳光一部分被表面物体所吸收, 另外一部分又被反射回大气层。图 1.1 所示为太阳光入射地面时的情况。

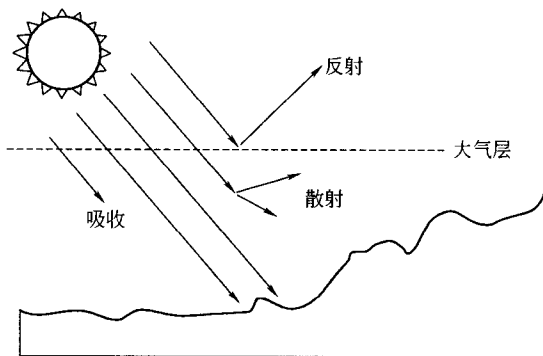


图 1.1 太阳光入射地面时的示意图

太阳光在其到达地球的平均距离处的自由空间中的辐射强度被定义为太阳能常数, 取值为 $1353 \text{ W}/\text{m}^2$ 。而大气对地球表面接收太阳光的影响程度被定义为大气质量 (air mass)。大气质量为零的状态 (AM0), 是指在地球外空间接收太阳光的情况, 适用于人造卫星和宇宙飞船等应用场合; 大气质量为 1 的状态 (AM1), 是指太阳光直接垂直照射到地球表面的情况, 其入射光功率为 $925 \text{ W}/\text{m}^2$, 相当于晴朗夏日在海平面上所承受的太阳光。这两者的区别在于大气对太阳光的衰减, 主要包括臭氧层对紫外线的吸收、水蒸气对红外线的吸收以及大气中尘埃和悬浮物的散射等。在太阳光入射角与地面成夹角 θ 时, 大气质量为

$$\text{AM} = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1.4)$$