

太阳电池

工作原理、工艺和系统的应用

[澳] 马丁·格林 著

李秀文 谢鸿礼 赵海滨等 译

刘 熙 校



SOLAR
CELLS

72.1787
466

太 阳 电 池

工作原理、
工艺和
系统的应用

[澳] 马丁·格林 著
李秀文 谢鸿礼 赵海滨等 译
刘 熙 校

31-321/03

電 工 業 出 版 社

内 容 简 介

本书介绍了太阳和太阳能电池的知识和基本理论,分析了限制太阳能电池转换效率的因素,详细描述了硅太阳能电池、组件、方阵和系统的设计、制造工艺、性能测试和应用。

对聚光电池、聚光系统和其它半导体材料的太阳能电池以及关于太阳能电池研究取得的新进展亦有相应的描述。

本书可供研制、生产和应用太阳能电池的技术人员阅读,也可作为大专院校有关专业师生的教学参考书。

SOLAR CELLS

Operating Principles,
Technology,

and System Applications

MARTIN A. CREEN

太 阳 电 池

工作原理、工艺和系统的应用

[澳] 马丁·格林 著

李秀文 谢鸿礼 赵海滨等 译

刘 熙 校

责任编辑: 坚如

*

电子工业出版社出版 (北京市万寿路)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京通县建新印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 8.75 字数: 233.5千字

1987年8月第1版 1987年9月第1次印刷

印数: 2500册 定价: 2.10元

统一书号: 15290·137

ISBN 7-5053-0067-9/TN40

前 言

当阳光照射到太阳电池时，可在没有机械转动或污染性副产物的情况下将入射能直接转换为电能。太阳电池早已不再是实验室仅有的珍品，它已有廿多年的使用历史。开始是提供空间电源，近来已用于地面电源系统。在不久的将来，这类电池的制造技术很可能得到显著改进。这样，太阳电池将可以在合适的价格下生产，从而对世界能源需求做出重要贡献。

本书将重点叙述太阳电池的基本工作原理和设计，目前采用的电池制造工艺和即将实施的改进工艺，以及在应用这些电池的系统的設計中的重要考虑。本书前面几章综述了阳光的性质、构成电池的半导体材料的有关性质以及这两者之间的相互作用。接下来几章详细地论述了太阳电池设计中的重要因素、现行的电池制造工艺以及未来可能的工艺。最后几章论及系统的应用，包括目前市售的小型系统和将来可能提供的住户和中心电源系统。

本书首先可供被这一迅速发展的领域所吸引的日益增多的工程技术人员和科学工作者使用，也适合用作大学生和研究生的课本。本书尽力使其内容适合于从不同专业进入这个领域的读者的需求。例如，包括了与理解太阳电池工作有关的半导体性质的形象性的综述。对于许多读者来说，这可作为一个简捷的复习，而对其他读者则可提供一个便于理解以后各章节内容的梗概。不管基础如何，通过学习本书并做练习将使读者在从事这个领域的工作时能很好地胜任。

我要对那些为数众多以致不能一一提及的人们表示感谢。他们在过去十多年中促进了我对太阳电池的兴趣。我要特别感谢 A·布莱克尔 (Andy Blakers), B·高德福莱 (Bruce Godfrey), P·哈尔特 (Phill Hart) 和 M·韦理森 (Mike Willi-

son) 的建议和间接支持我的这一尝试。特别要感谢 G·盖蓝恩 (Gelly Galang) 帮我准备底稿以及 J·妥德(John Todd) 和 M·韦理森 为本书准备照片。最后我要感谢 J·格林 (John Green) 在本书进展正紧张的时候给予的支持和鼓励。

M·A·格林

译者的话

太阳能电池属于物理电源，是一种特殊的半导体器件。由于它具有结构简单、制造方便、使用寿命长、维护简便、可靠性高、原材料丰富、无污染、无噪音等优点，又有太阳作为它的取之不尽、用之不竭的能源，因此，太阳能电池不仅在人造卫星、宇宙飞船等特殊应用中早就得到重视，而且，在诸如高山、海岛、牧场、人烟稀少的边远地区也已迅速推广。此外，它作为一种“光敏器件”已正在光学仪器、自动控制等领域与光电管相抗衡，无疑它将具有很强的竞争力。

太阳能电池应用的迅速发展已经引起从事教学、科研、生产和应用的有关学者、工程技术人员的极大兴趣和关注，并吸引了越来越多的人加入到太阳能电池研制、生产的行列。

本书作者马丁·格林 (Martin A. Green) 教授是澳大利亚新南威尔士大学联合微电子研究中心太阳能电池实验室负责人。他不仅在 MIS 太阳能电池理论方面造诣较深，而且在工艺研究方面也有不少成果。1984 年，他领导的实验室所研制的 MINP 单晶硅太阳能电池的转换效率已达 19.1% (AM 1.5, 28°C)，这是至今国际上所报导的最高水平。

本书比较系统地介绍了太阳能电池的基本理论；分析了限制太阳能电池转换效率的因素；详细描述了硅太阳能电池、组件、方阵和系统的设计、制造工艺、性能测试和应用，以及这方面的最新进展；同时，它还提及聚光电池及其他半导体材料的太阳能电池，内容比较丰富。它可供从事太阳能电池研制、生产和应用部门的技术人员以及有关专业师生阅读。

参加本书翻译的有电子工业部第十八研究所的谢鸿礼、申春幸、郭印池、杜福生、郑彝盎、赵海滨、宋礼彬、胡宏勋、李秀

文、罗荣萱、赵秀田、王保民、张德群、伍炳珍十四位同志（按参加翻译工作量多少顺序排列）。其中李秀文、谢鸿礼、赵海滨承担了预审。全书最后由刘熙和李秀文同志进行了统一审校和加工整理。第十八研究所毕道治总工程师对此书的翻译与出版工作给予了热情的关怀和支持，并亲自审校了部分译稿。

目 录

前 言

第一章 太阳电池和太阳光	1
1.1 引言	1
1.2 太阳电池发展概况	1
1.3 阳光的物理来源	2
1.4 太阳常数	3
1.5 地球表面的阳光强度	4
1.6 直接辐射和散射辐射	6
1.7 太阳的视运动	8
1.8 太阳的日照数据	8
1.9 小结	9
第二章 半导体的特性	13
2.1 引言	13
2.2 晶体结构和取向	13
2.3 禁带宽度	16
2.4 允许能态的占有几率	16
2.5 电子和空穴	20
2.6 电子与空穴的动力学	21
2.7 允许态的能量密度	23
2.8 电子和空穴的密度	24
2.9 IV族半导体的键模型	25
2.10 III族和V族掺杂剂	27
2.11 载流子浓度	28
2.12 掺杂半导体中费密能级的位置	31
2.13 其他类型杂质的影响	32
2.14 载流子的传输	33
2.14.1 漂移	33

2.14.2	扩散	35
2.15	小结	36
第三章	产生、复合及器件物理学的基本方程	39
3.1	引言	39
3.2	光与半导体的相互作用	39
3.3	光吸收	42
3.3.1	直接带隙半导体	42
3.3.2	间接带隙半导体	43
3.3.3	其他吸收过程	47
3.4	复合过程	49
3.4.1	弛豫到平衡	49
3.4.2	辐射复合	49
3.4.3	俄歇复合	51
3.4.4	通过陷阱的复合	52
3.4.5	表面复合	53
3.5	半导体器件物理学的基本方程	54
3.5.1	引言	54
3.5.2	泊松方程	54
3.5.3	电流密度方程	55
3.5.4	连续方程	55
3.5.5	方程组	56
3.6	小结	57
第四章	p-n结二极管	60
4.1	引言	60
4.2	p-n结的静电学	61
4.3	结电容	64
4.4	载流子注入	65
4.5	准中性区的扩散流	67
4.6	暗特性	69
4.6.1	准中性区中的少数载流子	69
4.6.2	少数载流子电流	71
4.7	光照特性	73

4.8	太阳电池的输出参数	76
4.9	有限电池尺寸对 I_0 的影响	77
4.10	小结	79
第五章	效率的极限、损失和测量	81
5.1	引言	81
5.2	效率的极限	81
5.2.1	概要	81
5.2.2	短路电流	81
5.2.3	开路电压和效率	83
5.2.4	黑体电池的效率极限	85
5.3	温度的影响	86
5.4	效率损失	87
5.4.1	概要	87
5.4.2	短路电流损失	88
5.4.3	开路电压损失	89
5.4.4	填充因数的损失	90
5.5	效率测试	93
5.6	小结	96
第六章	标准硅太阳电池工艺	98
6.1	引言	98
6.2	砂子还原为冶金级硅	100
6.3	冶金级硅提纯为半导体级硅	101
6.4	半导体级多晶硅变成单晶硅片	102
6.5	单晶硅片制成太阳电池	103
6.6	太阳电池封装成太阳电池组件	105
6.6.1	组件结构	105
6.6.2	电池的工作温度	108
6.6.3	组件的耐久性	108
6.6.4	组件电路设计	110
6.7	能量计算	112
6.8	小结	113
第七章	改进的硅电池工艺	116

7.1	引言	116
7.2	太阳能电池级硅	116
7.3	硅片	117
7.3.1	硅片的要求	117
7.3.2	铸锭工艺	118
7.3.3	带硅	118
7.4	电池的制造和互联	121
7.5	可供选择的工厂的分析	125
7.6	小结	129
第八章	硅太阳能电池的设计	133
8.1	引言	133
8.2	主要依据	133
8.2.1	光生载流子的收集几率	133
8.2.2	结深	138
8.2.3	顶层的横向电阻	139
8.3	基体掺杂	141
8.4	背面场	144
8.5	顶层的限制	145
8.5.1	死层	145
8.5.2	高掺杂效应	147
8.5.3	对饱和电流密度的影响	147
8.6	上电极的设计	147
8.7	光学设计	155
8.7.1	减反射膜	155
8.7.2	绒面	158
8.8	光谱响应	159
8.9	小结	161
第九章	其他器件结构	164
9.1	引言	164
9.2	同质结	164
9.3	半导体异质结	166
9.4	金属-半导体异质结	168

9.5	实用的低电阻接触	171
9.6	MIS 太阳电池	171
9.7	光电化学电池	174
9.7.1	半导体-液体异质结	174
9.7.2	电化学光伏电池	174
9.7.3	光电解电池	177
9.8	小结	178
第十章 其他半导体材料		181
10.1	引言	181
10.2	多晶硅	181
10.3	非晶硅	183
10.4	砷化镓太阳电池	186
10.4.1	GaAs的特性	186
10.4.2	GaAs 同质结	187
10.4.3	$\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$ 异质界面电池	188
10.4.4	AlAs/GaAs 异质结	188
10.5	$\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 太阳电池	189
10.5.1	电池结构	189
10.5.2	工作特性	190
10.5.3	$\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 电池的优缺点	192
10.6	小结	193
第十一章 聚光系统		198
11.1	引言	198
11.2	理想聚光器	198
11.3	固定式和定期调整式聚光器	200
11.4	带跟踪的聚光器	202
11.5	聚光电池设计	204
11.6	超高效率系统	206
11.6.1	概要	206
11.6.2	多带隙电池概念	206
11.6.3	热光伏转换	211
11.7	小结	213

第十二章	光伏系统：组成和应用	217
12.1	引言	217
12.2	能量的储存	217
12.2.1	电化学电池	217
12.2.2	大容量储能途径	219
12.3	功率调节装置	220
12.4	光伏应用	222
12.5	小结	222
第十三章	独立系统的设计	225
13.1	引言	225
13.2	太阳能电池组件的性能	225
13.3	蓄电池性能	226
13.3.1	性能要求	226
13.3.2	铅-酸蓄电池组	227
13.3.3	镍-镉蓄电池组	229
13.4	功率控制	230
13.5	系统的设计	234
13.6	水泵	241
13.7	小结	242
第十四章	住户用的和集中的光伏电源系统	244
14.1	引言	244
14.2	住户用的系统	244
14.2.1	储能方式的选择	244
14.2.2	组件的安装	245
14.2.3	供热	248
14.2.4	系统的线路	248
14.2.5	示范计划	249
14.3	中心发电站	251
14.3.1	一般考虑	251
14.3.2	工作方式	254
14.3.3	卫星太阳能电站	256
14.4	小结	257

附录A	物理常数	260
附录B	硅的部分特性	261
附录C	符号一览表	261

第一章 太阳电池和太阳光

1.1 引言

太阳电池利用半导体材料的电子特性把阳光直接转换成电能。在以下几章里，将从太阳电池工作的基本物理原理出发研究这个微妙的能量转换过程，以此为基础，推导了定量表示能量转换关系的数学公式。接着，叙述了目前商用的、以半导体硅为主体材料的太阳电池的生产工艺和该工艺的改进，以及可能明显降低成本的另一些工艺。最后，讨论了太阳电池系统的设计，涉及的范围从应用于边远地区的小型电源到将来可能应用的住户用电和中心电站。

本章简要地回顾了太阳电池的发展历史，叙述了太阳及其辐射的特性。

1.2 太阳电池发展概况

太阳电池依靠光伏效应工作。1839年贝克勒尔(Becquerel)首先报导了这一效应，他观察到浸在电解液中的电极之间有光致电压。1876年，在硒的全固态系统中也观察到了类似现象。随后，发展了以硒和氧化亚铜为材料的光电池。虽然1941年就有了关于硅电池的报导，但直到1954年才出现了现在的硅电池的第一代产品。因为它是第一个能以适当效率将光能转为电能的光伏装置，所以它的出现标志着太阳电池研制工作的重大进展。早在1958年，这种电池就用作宇宙飞船的电源。到60年代初，供空间应用的电池的设计已经成熟。此后十多年，太阳电池主要用于空间。这个阶段更详细的情况见参考文献^[1,1]。

70年代初，硅电池的发展经历了一个革新阶段，能量转换效

率得到明显提高。大约与此同时，人们对太阳电池的地面应用重又发生了兴趣。到70年代末，地面应用的太阳电池的数量已超过了空间应用的数量。成本也随着生产量的增加而明显下降。80年代初，出现一些新的工艺，这些工艺正通过试生产进行评价，这就为后十年进一步降低成本做好准备。随着成本的不断降低，这种通过光伏效应利用太阳能的方法的商业应用范围会越来越大。

1.3 阳光的物理来源

来自太阳的辐射能对地球上的生命是必不可少的。它决定地球表面的温度，而且实际上提供了球地表面和大气层中自然过程的全部能量。

太阳实质上是一个由其中心发生的核聚变反应所加热的气体球。热物体发出电磁辐射，其波长或光谱分布由该物体的温度所决定。完全的吸收体，即“黑体”，所发出的辐射的光谱分布由普朗克辐射定律确定^(1,2)。如图1.1所示，这个定律表明，当物体被加热时，不仅所发出的电磁辐射总能量增加，而且发射的峰值波长也变短。我们几乎都有这样的经验，当金属被加热时，随着温度升高，其颜色由红变黄，这就是一个例证。

据估计，太阳中心附近的温度高达20 000 000 K。然而，这并不是决定太阳电磁辐射的温度。来自太阳深处的强烈辐射大部分被太阳表面附近的负氢离子层所吸收。这些离子对很大波长范围的辐射起着连续吸收体的作用。这个负氢离子层积聚的热量引起了对流，通过对流，将能量传过光阻挡层（图1.2）。能量一旦传过光阻挡层之大部分，就重新被辐射到较易透射的外层气体中。这个将对流传热转为辐射传热的界限明显的层就称为光球。光球层的温度比太阳内部的温度低得多，但仍然高达6000 K。光球层的辐射光谱基本上是连续的电磁辐射光谱，它和预期的黑体在此温度下的辐射光谱很接近。

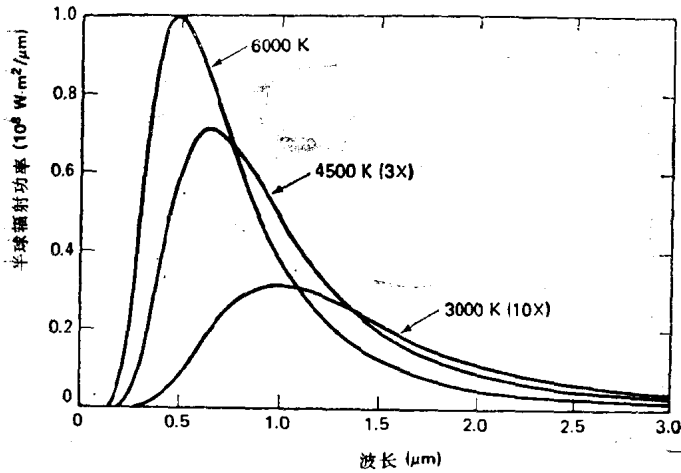


图 1.1 不同黑体温度的普朗克黑体辐射分布

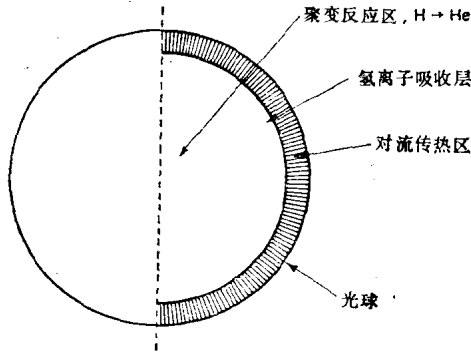


图 1.2 太阳的主要特征

1.4 太阳常数

在地球大气层之外，地球-太阳平均距离处，垂直于太阳光方向的单位面积上的辐射能基本上为一常数。这个辐射强度称为太阳常数，或称此辐射为大气质量为零 (AMO) 的辐射，其理