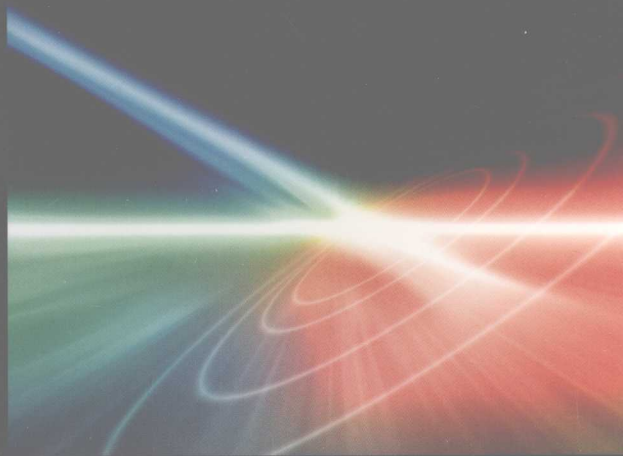




APPLIED PHOTOVOLTAICS

应用光伏学

原作者 S.R. Wenham M.A. Green
M.E. Watt R. Corkish

译作者

狄大卫	高兆利	韩见殊	石 磊	魏 伟
施正荣	张光春	李 华	杨 健	于 佳
陆红艳	刘皎彦	吕绍杰	梅晓东	

上海交通大学出版社

应用光伏学

APPLIED PHOTOVOLTAICS

原作者 S. R. Wenham M. A. Green
M. E. Watt R. Corkish

译作者 狄大卫 高兆利 韩见殊 石磊 魏伟
施正荣 张光春 李华 杨健 于佳
陆红艳 刘皎彦 吕绍杰 梅晓东

上海交通大学出版社

内 容 提 要

随着传统燃料资源频频告急,不可再生能源的使用对环境造成的危害日益加剧,太阳能产业巨大的潜力受到世界各国的关注。本书内容包括太阳辐射的特性,半导体与 P-N 结基础,太阳能电池的原理、特性及设计,光伏特殊应用等。对于高等院校师生以及光伏从业者而言,本书是一部优秀的教材与参考资料。

First published by Earthscan in the UK and USA in 2007

Copyright © 2007, ARC Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics

Chinese (simplified characters) rights © 2008 by SJTUP

上海市版权局著作权合同登记:图字 09-2008-004 号

图书在版编目(CIP)数据

应用光伏学/(澳)伟纳姆(S. R. Wenham)等编;狄大卫等译. —上海:上海交通大学出版社,2008
ISBN978-7-313-05132-5

I. 应... II. ①伟... ②狄... III. 太阳能发电—研究 IV. TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 016500 号

应用光伏学

(澳)伟纳姆(S. R. Wenham) 等编

狄大卫 等译

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海交大印务有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:15.5 字数:377 千字

2008 年 4 月第 1 版 2008 年 4 月第 1 次印刷

印数:1~3050

ISBN978-7-313-05132-5/TM·139 定价:45.00 元

版权所有 侵权必究

鸣 谢

近年来,Dean Travers 博士,Christiana Honsberg 博士,Armin Aberle 教授以及 Alistair Sproul 博士讲授了由澳大利亚新南威尔士大学光伏工程研究中心(原属电气工程系)开设的本科课程“应用光伏学”。Alistair Sproul 博士为本书(英文原版)的编辑,尤其在校正、提供修改建议与数据提供等方面提供了重大的帮助。作者同样感谢来自学生们的反馈,各方对课程内容、结构改进的建议以及对额外课件的提供。

作者感谢来自新南威尔士大学光伏工程研究中心的众多成员,特别是 Jenny Hansen, Roman Balla, Robert Largent, Matt Edwards 与 Robert Passey 和来自 Greenwatt 有限公司的 David Roche 为本书的文字输入、格式设定、图片编排以及最终的排版等作出极有价值的工作。本书由新南威尔士大学的狄大卫、高兆利、韩见殊、石磊与魏伟以及无锡尚德太阳能电力有限公司的施正荣(总经理)、张光春等协力翻译并编辑成中文版本。特别感谢新南威尔士大学的翻译人员认真细致的工作以及对英文原版的审查、修正与改进作出的贡献。作者同样感谢上海交通大学出版社、上海交通大学物理系太阳能研究所的崔容强教授和汪建强为本书的中文版在中国出版发行提供的重要帮助。

感谢以下组织或人员对本书中图片的使用或更改进行授权:澳大利亚 CSIRO(CSIRO Australia)(图 1-11),Aden 博士与 Marjorie Meinel(图 1-12),澳大利亚气象局(Australian Bureau of Meteorology)(图 1-13),美国圣第亚国家实验室(Sandia National Laboratories)(图 6-7,6-8,7-1,7-2,9-3,11-1,11-3),电气和电子工程师学会(IEEE)(图 4-14,5-1,9-5,10-4,10-5,10-7,10-8,10-10,10-11,10-13,G-1,G-2),澳大利亚电信协会(Telecommunications Society of Australia)(图 6-2,6-3,6-4),Silcar 有限公司设计与建造部(Silcar Pty Ltd. Design & Construction)(图 8-2),Springer 科学与商业媒体(Springer Science and Business Media)(图 8-3,8-4,11-12,11-16,11-17),Halcrow & Partners(图 8-5,8-6,8-7,11-8,11-9,11-11,11-15,H-4),地方能量资源信息中心(Regional Energy Resources Information Centre)(图 11-2),M. Sahdev(图 11-5),Thomson(图 11-6)与 McGraw-Hill 图书公司(McGraw-Hill Book Companies)(图 1-14,1-17,11-10,11-13,11-14)。感谢 ASTM International 提供附录 A 的数据表格以及 Daryl Myers 和 Keith Emery(NREL,国家可再生能源实验室)的协助。

《Applied Photovoltaics》英文原著作者

2007 年 8 月于新南威尔士大学

序

所谓光伏,是指通过太阳能电池为媒介,将太阳光直接转化为电能的过程。光伏太阳能电池的能量转换机制不同于太阳热发电,更与太阳能热水系统对太阳能的利用存在本质的差异。光伏技术建立在量子力学和半导体物理学的理论基础上,致力于光电材料与器件的研发与应用,实现常温下光能与电能的直接转换。

随着煤炭、石油等传统燃料资源的频频告急,不可再生能源的使用对环境造成的危害日益加剧,能源问题将严重制约人类工业和经济的发展。取之不尽、用之不竭、廉价无污染的太阳辐射能将成为未来最重要的可再生能源。太阳能产业潜力巨大。全球光伏制造业正以每年40%的速度增长,2006年光伏电池产量达到2600兆瓦。2006年,中国的光伏产业规模超越美国,跃居世界第三,仅次于日本和德国。同年,中国光伏产业的领军企业——无锡尚德太阳能电力有限公司的太阳能组件产能高居全球第一。随着中国光伏公司的发展壮大和在海外相继上市,光伏产业更是焕发了巨大的吸引力。

然而我们仍然清楚地看到,在光伏产业高歌猛进的同时,由于光伏技术信息更新相对滞后,国内光伏技术的专业人才严重缺乏,不少著名光伏企业不惜斥资高薪聘用海外专家和留学学者参与太阳能电池技术的研究和开发。为缓和光伏领域专业人才匮乏的局面,全面提高我国光伏太阳能技术人才的培养质量和教学水平,在澳大利亚新南威尔士大学光伏工程研究中心以及无锡尚德太阳能电力有限公司的共同支持下,召集国内外光伏领域的专家、学者以及从业人员共同编译了这本《应用光伏学》教材。

本书英文版原著《Applied Photovoltaics》是由澳大利亚新南威尔士大学光伏工程研究中心开设的、电气工程系和太阳能与可再生能源工程系同名专业课程“应用光伏学”所使用的标准教材,原著作者 Martin Green 教授(执行研究主任)、Stuart Wenham 教授(研究中心主任)、Richard Corkish 博士(光伏工程学院院长)和 Muriel Watt 博士均是新南威尔士大学光伏工程研究中心的资深专家和光伏太阳能业界权威。十余载以来,研究中心在 Green 教授与 Wenham 教授的领导下取得了极其辉煌的成就,在硅材料太阳能电池研究方面世界领先,是单结单晶硅太阳能电池效率的世界纪录突破者和保持者。

对于高等院校师生以及光伏从业者而言,本书是一部优秀的教材与参考资料。全书共分12章,主要内容包括太阳辐射的特性,半导体与P-N结基础,太阳能电池的原理、特性及设计,光伏电池的互联与组件的装配,独立光伏系统组成与设计,光伏特殊应用,偏远地区供电系统,并网光伏系统以及光伏水泵系统等。每一章之后都附有习题和参考文献,全书末尾提供附录和索引。本书译本在忠实于原著的基础上,力求深入浅出、逻辑清晰、理论严谨、叙述明确,便于读者理解与掌握。

本书译本的初稿由无锡尚德太阳能电力有限公司的施正荣博士(总经理)、张光春、李华、杨健、于佳、陆红艳、刘皎彦、吕绍杰与梅晓东等提供。

新南威尔士大学方面为本书特别成立了编译组,成员包括(按汉语拼音顺序):狄大卫、高兆利、韩见殊、石磊与魏伟。其中狄大卫进行了本序的撰写,负责引言、第1、第3章、附录A~

D 的翻译与编辑工作,并参与了第 2、第 4、第 5、第 6、第 10 章的审校和修改;高兆利负责第 9、第 11、第 12、附录 H 的翻译与编辑工作,并参与了第 2、第 3、第 7、第 8、第 10 章的审校和修改;韩见殊负责第 6、第 7、第 10、附录 G 的翻译与编辑工作,参与了第 1、第 8、第 9、第 11、第 12 章的审校和修改;石磊负责第 2、第 4、附录 E 的翻译与编辑工作,并参与了引言、第 1、第 3、第 5、第 6 章的审校和修改;魏伟负责第 5、第 8、附录 F 的翻译与编辑工作,并参与了第 4、第 7、第 9、第 11、第 12 章的审校和修改。

新南威尔士大学编译组的全体成员特别感谢光伏工程学院院长 Richard Corkish 博士对编辑工作的组织、支持与指导,感谢校友周宜诚为本书精心修缮版式与制作目录,并感谢上海交通大学出版社、上海交通大学物理系太阳能研究所的崔容强教授和汪建强对本书的出版与发行提供鼎力支持。

由于主要编译和审校人员大多为年轻学者,水平和时间所限,译本中的纰漏和失误之处,恳请广大读者不吝赐教。

以此短序,谨贺本书成功出版。

《应用光伏学》编译组

2007 年 8 月于新南威尔士大学

目 录

引言	1
第 1 章 太阳光的特性	2
1.1 波粒二象性	2
1.2 黑体辐射	2
1.3 太阳及其辐射	3
1.4 太阳的辐射	3
1.5 直接辐射和漫射	5
1.6 温室效应	6
1.7 太阳的视运动	6
1.8 日照数据及估算	8
1.8.1 地外辐射	8
1.8.2 在水平面上的陆地全局辐射	8
1.8.3 全局辐射与漫射成分	12
1.8.4 落在倾斜表面上的辐射	14
1.9 太阳能与光伏学	17
习题	17
第 2 章 半导体与 P-N 结	20
2.1 半导体	20
2.1.1 化学键模型	20
2.1.2 能带模型	20
2.1.3 掺杂	21
2.2 半导体的种类	21
2.2.1 单晶硅(sc-Si)	22
2.2.2 多晶硅(mc-Si)	22
2.2.3 非晶硅(a-Si)	22
2.2.4 薄膜晶体硅	22
2.3 光的吸收	23
2.4 复合	24
2.5 P-N 结	24
习题	25

第3章 太阳能电池的特性	26
3.1 光照的影响	26
3.2 光谱响应	28
3.3 温度的影响	29
3.4 寄生电阻的影响	30
习题	32
第4章 太阳能电池特性和设计	33
4.1 效率	33
4.2 光学损失	33
4.3 复合损失	35
4.4 顶电极设计	37
4.4.1 体电阻率和方块电阻	37
4.4.2 栅线间隔	38
4.4.3 其他损失	38
4.5 实验室电池与工业要求的对比	40
4.6 激光刻槽-埋栅太阳能电池	40
习题	42
第5章 光伏电池的互联和组件的装配	44
5.1 组件和电路设计	44
5.2 相同特性的电池	44
5.3 非相同特性的电池	44
5.4 非相同特性的电池组件	45
5.5 热点过热	46
5.6 组件构造	48
5.7 抗候性	49
5.8 温度因素	49
5.9 电绝缘	51
5.10 机械保护	52
5.11 降格与失效	52
5.12 物化能量和生命周期的问题	54
习题	55
第6章 独立光伏系统的结构	57
6.1 引言	57
6.2 独立光伏系统设计	58
6.3 电池组件	59
6.4 蓄电池	60

6.4.1	电池种类	60
6.4.2	应用	60
6.4.3	要求	60
6.4.4	效率	61
6.4.5	额定功率和容量	61
6.4.6	放电深度	61
6.5	铅酸蓄电池	61
6.5.1	类型	61
6.5.2	极板材料	62
6.5.3	充电	62
6.5.4	效率	63
6.5.5	工业标准和分类	63
6.6	其他蓄电池设备	63
6.6.1	镍镉蓄电池	63
6.6.2	镍氢蓄电池	64
6.6.3	可充电碱性锰蓄电池	64
6.6.4	锂离子和锂聚合物蓄电池	64
6.6.5	氧化还原蓄电池	65
6.6.6	大型电容器	65
6.7	功率调节与控制	65
6.7.1	二极管	65
6.7.2	稳压器	65
6.7.3	逆变器	68
6.8	系统平衡器件	69
6.8.1	电路布线	69
6.8.2	过流保护	70
6.8.3	开关	70
6.8.4	连接器	70
6.8.5	接地	71
6.8.6	雷电防护	71
6.8.7	计量和报警	71
6.8.8	蓄电池保护和安全标识	71
6.8.9	电子元器件的保护	72
6.8.10	组件支架	72
	习题	75
第7章 独立光伏系统设计		78
7.1	引言	78
7.2	系统利用率	78

7.3 混合系统	79
7.4 光伏系统的简易设计方法	80
7.5 圣第亚国家实验室的方法	81
7.6 《澳大利亚标准 AS4509.2》	82
7.7 系统设计软件	83
习题	83
第8章 光伏的特殊应用	85
8.1 引言	85
8.2 空间应用	85
8.3 海洋航行辅助	85
8.4 无线电通信	86
8.4.1 便携式光伏电源	86
8.4.2 无线电话服务	87
8.4.3 手机网络	87
8.4.4 光纤网络	88
8.5 阴极保护	88
8.5.1 系统尺寸	88
8.5.2 控制器	89
8.5.3 电源供应系统	89
8.6 水泵	91
8.7 室内使用的消费光伏产品	94
8.8 电池充电器	94
8.9 发展中国家的光伏发电	94
8.10 冷藏	95
8.11 光伏动力运输	96
8.12 太阳能汽车	97
8.13 照明	98
8.14 远程监测	99
8.15 直接驱动的应用	99
8.16 电力防护栅栏	100
习题	100
第9章 偏远地区供电系统	104
9.1 家用电力系统	104
9.1.1 交流或直流的选择	105
9.1.2 电器用品	106
9.1.3 用户用电指导	108
9.1.4 光伏-柴油/汽油混合发电系统	109

9.1.5 柴油发电机	110
9.1.6 汽油发电机	111
9.1.7 混合系统设计	111
9.2 RAPS 系统成本	113
9.3 便携式 RAPS 系统	113
9.3.1 边远地区原住居民用便携系统	113
9.3.2 太阳能集成屋	114
9.3.3 Stationpower®	114
9.4 可靠性和维护	115
9.5 政府援助计划	115
习题	116
第 10 章 并网光伏系统	119
10.1 引言	119
10.2 光伏系统在建筑上的应用	119
10.2.1 太阳能板的安装	120
10.2.2 逆变器	121
10.2.3 本地存储	122
10.2.4 系统规模和经济分析	123
10.2.5 其他方面	124
10.3 光伏在公共电网中的应用	124
10.4 光伏集中发电站的设计	125
10.5 安全	129
10.6 光伏发电的价值	129
10.6.1 能源效益	129
10.6.2 产能信用度	130
10.6.3 分布优势	130
10.6.4 实例 1:加利福尼亚,科尔曼配电支线 1103	131
10.6.5 实例 2:澳大利亚,卡尔巴里	133
10.7 国际光伏市场	133
10.7.1 美国	133
10.7.2 日本	135
10.7.3 欧洲	136
10.7.4 印度	137
10.7.5 中国	137
10.7.6 澳大利亚	137
习题	138

第 11 章 光伏水泵系统	144
11.1 引言	144
11.2 系统布局	144
11.3 水泵	146
11.3.1 离心泵	147
11.3.2 容积泵	148
11.4 电动机	150
11.4.1 引言	150
11.4.2 直流电动机	151
11.4.3 交流电动机	153
11.4.4 电动机耗损	154
11.4.5 集成泵/电动机机械	154
11.5 功率调节电路	154
11.6 蓄电池/充电电池	157
11.7 阵列线路布线与安装	158
11.7.1 阵列布线	158
11.7.2 组件安装	158
习题	159
第 12 章 光伏水泵系统设计	162
12.1 引言	162
12.2 系统设计的基本步骤	162
12.3 直接耦合系统的设计	163
附录 A 标准 AM0 与 AM1.5 光谱	166
附录 B 计算太阳位置的公式	172
附录 C 特征日期与日偏角	174
附录 D 部分日照数据来源	175
附录 E 工业标准	180
附录 F 水泵的可选动力来源	201
附录 G 独立光伏系统设计	205
附录 H 光伏供电的水泵系统设计	211
索引	222

引言

所谓光伏,是指以太阳能电池为媒介,将太阳光直接转化为电能的过程。1839年,19岁的法国年轻科学家埃德蒙·贝克勒尔在其父亲的实验室中成功研制了世界上第一枚光伏器件。然而,对于光伏效应的理解与探索,则是基于20世纪最为至关重要的两项科技进步之上。其一,是作为20世纪人类重大智慧成果的量子力学的发展。其二,是以量子论为基石的半导体技术,成就了磅礴的电子工业革命,并引导了光子技术的新兴。对于现代光伏科技的发展史,Loferski(1993)作出了饶有趣味的描述。对于追溯到1839年的一些早期的历史,Crossley(1968)等几位学者则记述了更偏重于技术性的细节。

值得庆幸的是,不仅拥有完备的理论基础,太阳能电池在使用上的简洁与可靠同样是该技术的强大优势之一。在本书的最初几个章节中,将着重于探索光伏过程中最重要的两个组成部分——作为能量源泉的太阳光以及通过精巧的内部机制,将光能转化为电能的太阳能电池本身的性质。接下来则会提及太阳能电池和组件的生产工艺,其后是各类光伏系统的介绍,包括太阳能汽车、住房的独立电源供给或水泵系统以及大规模并网发电站等。

《应用光伏学》一书的主旨,是向有关从业人员提供光伏系统操作原理的一些基本信息,使之了解光伏的各种应用并能从事简单的光伏系统设计。本书是基于澳大利亚新南威尔士大学光伏与太阳能工程、再生能源工程与电气工程的本科生课程教学资料而编写的,并将继续被用作标准教材。作者期望,随着掌握光伏概念及应用专业知识的毕业生的逐年增加,能够为社会提供优秀的工程师,以参与并推进全球光伏工业的高速发展。

参考文献

- [1] Crossley PA, Noel GT, Wolf M. 1968. Review and Evaluation of Past Solar-Cell Development Efforts, Report by RCA Astro-Electronics Division for NASA, NASW-1427 [R]. Washington, DC.
- [2] Loferski JJ, 1993. The first forty years: A brief history of the modern photovoltaic age [M]//Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 1, 67-78.

第 1 章 太阳光的特性

1.1 波粒二象性

在过去的几个世纪里,围绕着表面上相互冲突的两派学说,人们对光的本性的认识产生了反复的变化。针对量子理论的进化史,Gribben 作出了深入浅出的描述(1984)。在 17 世纪后期,牛顿所主张的光是由微小粒子组成的观点开始盛行。到了 19 世纪早期,杨和菲涅耳的实验发现了光的干涉效应,表明光是由波组成的。直到 19 世纪 60 年代,麦克斯韦的电磁辐射理论被接受,光被认为是由不同波长组成的电磁波谱中的一部分。1905 年,爱因斯坦阐释了光电效应,他指出光是由不连续的粒子或能量子组成的。既是粒子又是波,光同时具有这两种对立而互补的性质,这一观点现已广泛接受。这一理论也被称为波粒二象性,且可总结为下列等式:

$$E = hf = hc/\lambda \quad (1-1)$$

频率是 f 或波长是 λ 的光,产生的波包或光子的能量是 E , h 是普朗克常量($6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$), c 是光速($3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$)(NIST, 2002)。

在定义光伏或太阳能电池特性时,光有时被作为波来处理,其余情况下作为粒子或光子处理。

1.2 黑体辐射

黑体对于辐射来说是一个理想的吸收体或发射体。当它被加热后,开始发光;也就是说,开始发出电磁辐射。一个典型的例子就是金属的加热。金属温度越高,发射的光的波长越短,发光的颜色由最初的红色逐渐变为白色。

经典物理无法解释由此类发热体发出的光的波长能谱分布。然而,在 1900 年,由普朗克所推导的一个数学表达式描述了这个能谱分布,尽管人们当时对黑体辐射的物理机制一无所知。五年后,爱因斯坦用量子理论做出了解释。黑体的光谱辐射功率是指从 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 极小的波长变化范围内每单位面积辐射的功率,它服从普朗克分布(Incropera & DeWitt, 2002)

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/(\lambda kT)) - 1]} \quad (1-2)$$

这里 k 是玻耳兹曼常数, E 的量纲是单位面积单位波长的功率。黑体的总辐射功率,由单位面积所辐射的功率所表示。这个单位面积总辐射功率可以通过对式(1-2)积分而得到,以波长作为变量从零到正无穷大进行累积,结果是 $E = \sigma T^4$, σ 是斯忒藩-玻耳兹曼常数(Incropera & DeWitt, 2002)。

图 1-1 描述了黑体在不同温度时在黑体表面所观测到辐射的能谱分布。最低的曲线表示的是被加热到 3000 K 的黑体,温度大约是正常工作时白炽灯钨丝的温度。处于辐射能量峰值

的波长约是 $1\mu\text{m}$, 属于红外波段。在这种情况下, 在可见光波段 ($0.4\sim 0.8\mu\text{m}$) 只有少量的能量发射, 这正是白炽灯效率低下的原因。将辐射峰值波长移动到可见光谱内需要极高的温度, 超过绝大部分金属的熔点。

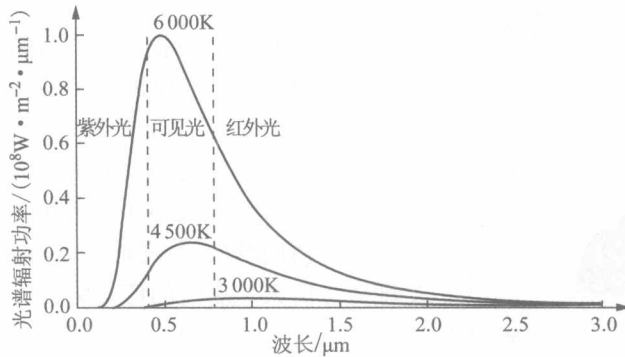


图 1-1 在三个不同温度下理想黑体表面辐射能谱分布

1.3 太阳及其辐射

太阳是一个通过其中心的核聚变反应产生热量的气体球(Quaschnig, 2003)。内部温度高达 $2\times 10^7\text{K}$ 。如图 1-2 所示, 内部强烈的辐射被靠近太阳表面的一层氢离子所吸收。能量以对流的形式穿透通过这层光阻, 然后在太阳的外表面的光球层重新向外辐射。如图 1-3 所示, 这个辐射强度接近于温度为 6000K 的黑体辐射。

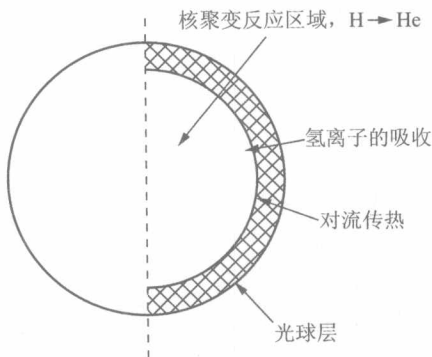


图 1-2 太阳内部的不同区域

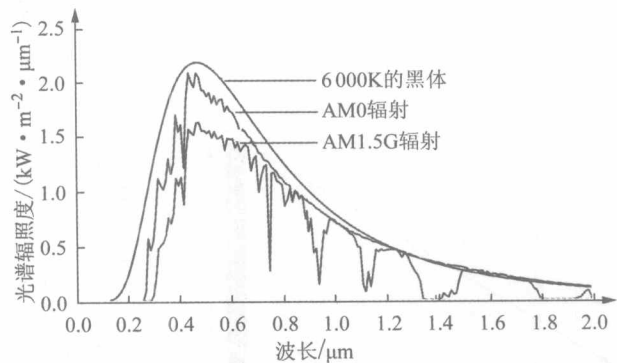


图 1-3 表面温度 6000K 的黑体的光谱辐照度, 位于恰好是地球大气层以外位置所观察到的太阳光球层的光谱辐照度 (AM0), 以及在穿透 1.5 倍于地球大气层垂直厚度的地球大气之后的太阳光球层的光谱辐照度 (AM1.5G)

1.4 太阳的辐射

虽然太阳的表面辐射水平几乎恒定(Gueymard, 2004; Willson & Hudson, 1988), 但是当到达地球表面时, 太阳光受地球大气层的吸收和散射作用影响强烈, 因而成为变量。

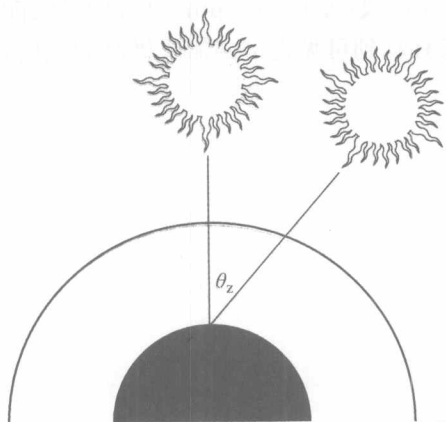


图 1-4 太阳辐射所穿过的大气厚度(大气光学质量)取决于太阳在天空中的位置

当天空晴朗,太阳在头顶直射且阳光在大气中经过的光程最短时,到达地球表面的太阳辐射最强。如图 1-4 所示,这个光程可用 $1/\cos \theta_z$ 近似, θ_z 是太阳光和本地垂线的夹角。

这个光程一般被定义为太阳辐射到达地球表面必须经过的大气光学质量 AM (air mass)。因此,

$$AM = 1/\cos \theta_z \quad (1-3)$$

这是基于对均匀无折射的大气层的假设,在接近地平线时将引入大约 10% 的误差。Iqbal (1983) 给出了更加精确的公式,考虑到了光线通过密度随大气高度变化的大气层时的弯曲路径。

当 $\theta_z = 0^\circ$ 时,大气光学质量等于 1 或称 AM1; 当 $\theta_z = 60^\circ$ 时,则是大气光学质量是 2 或 AM2 的情况。AM1.5 (相当于太阳光和垂线方向成 48.2° 角) 为光伏业界的标准。

任何地点的大气光学质量可以由下列公式估算:

$$AM = \sqrt{1 + (s/h)^2} \quad (1-4)$$

如图 1-5 所示, s 是高度为 h 的竖直杆的投影长度。

太阳光在大气层外(即大气光学质量为零或者 AM0)和 AM1.5 时的光谱能谱分布如图 1-6 所示。AM0 从本质上来讲是不变的,将它的功率密度在整个光谱范围积分的总和,称作太阳常数 (ASTM, 2000, 2003; Gueymard, 2004), 它的公认值是

$$\gamma = 1.3661 \text{ kW/m}^2 \quad (1-5)$$

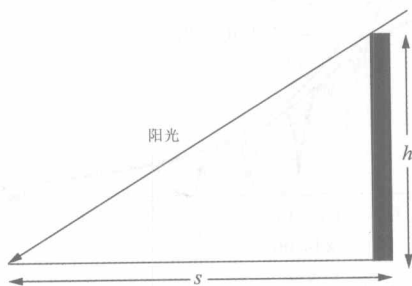


图 1-5 利用已知高度的物体的投影估算大气光学质量

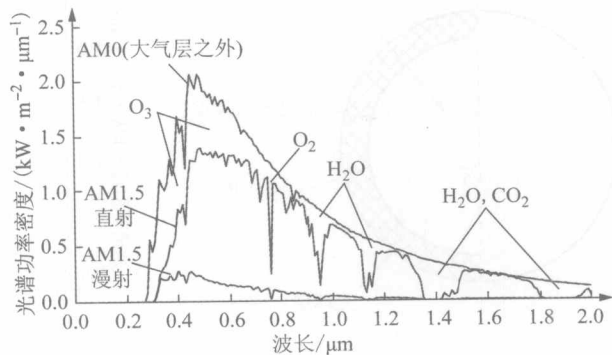


图 1-6 在大气层外 (AM0) 和地球表面 (AM1.5) 时太阳光的光谱功率密度, 反映出不同的大气成分的吸收

通常情况下,将来自太阳本身的直射光束和来自天空的漫射光分开进行考虑,两者的总和被称作全局辐射(或称总辐射)。附录 A 中给出的表格描述了在大气光学质量为 AM1.5 时,位于地面上的一个仰角为 37° ,面向赤道平面所接收到的全局辐照量和波长的对比。由于不同种类的太阳能电池对不同波长的光响应各不相同,该表格能被用来估算不同电池的潜在输出电力。

对附录 A 的光谱而言,总的能量密度,也就是对整个波长范围的功率密度的积分,接近

970 W/m^2 。这个光谱或能量密度为 1000 W/m^2 的“归一化”光谱是现阶段划分光伏产品等级的标准。后者在数值上接近地球表面所接收到的最大功率值。在附录 A 中,与归一化光谱相对应的功率和光子流密度可以通过将附录 A 中数值乘以系数 $1000/970$ 而获得。

为了评定太阳能电池或组件在实际系统中的性能,上面讨论的标准光谱必须与系统安装地点的实际的太阳光照水平相联系(图 1-12 给出了每日太阳辐照水平的全局和季节性的变化)。

1.5 直接辐射和漫射

当到达地球表面时,穿过地球大气层的太阳光被减少或削弱了大约 30%,其影响因素(Gast,1960;Iqbal,1983)如下:

- (1) 大气中分子的瑞利散射,对短波长光而言更为明显。
- (2) 烟雾和尘埃粒子的散射。
- (3) 大气中气体的吸收,如氧气,臭氧,水蒸气和二氧化碳(CO_2)。

大气气体造成的吸收光谱带如图 1-6 中所示。臭氧强烈吸收波长低于 $0.3 \mu\text{m}$ 的光波。大气层中臭氧的损耗使得更多的这种短波长的光到达地球表面,而这将对生物系统产生有害的影响。 $1 \mu\text{m}$ 左右的吸收光谱带,是通过水蒸气吸收产生的, CO_2 吸收更长波长的光波,而大气中 CO_2 成分的改变也会对气候和生物系统产生影响。

图 1-7 指出,大气的散射作用导致了从天空中不同方向射来的漫射太阳光。由于大部分的有效散射发生在短波长范围里,漫射辐射在自然光谱的蓝端区域起主导作用。因此,天空呈现蓝色。AM1 辐射(太阳在头顶直射时的辐射)在天空晴朗时大约有 10% 漫射辐射成分。漫射所占的百分比随着大气光学质量或者天空的阴云程度的增加而增加。

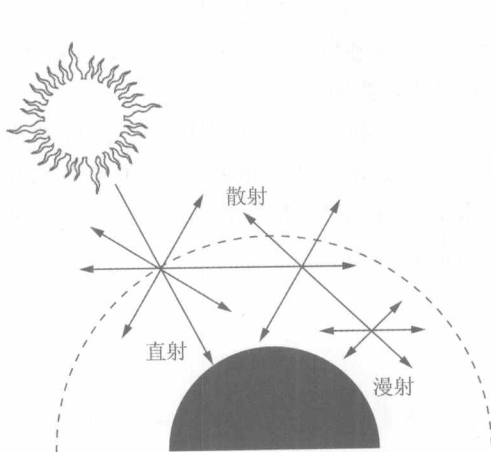


图 1-7 由大气散射导致的漫射辐射

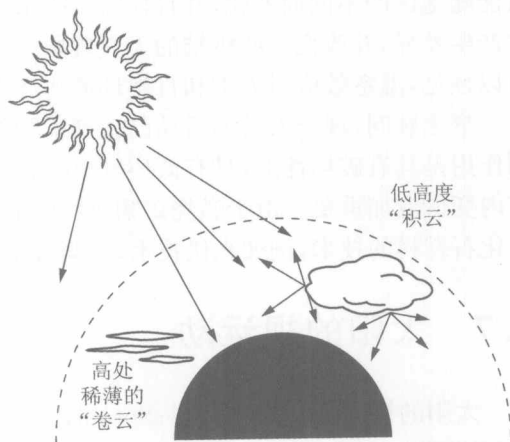


图 1-8 云层覆盖状况对到达地球表面的辐射的影响

当然,云层是太阳光在大气中衰减和产生散射的一个要因。积云,或处于低空体积较大的云层能够非常有效地阻挡太阳光。然而,大约有一半被积云阻挡的直接辐射能够以漫射辐射的形式重新到达地面。卷云,或稀薄的高处云层,对阳光的阻挡就不是那么有效了,大约 $2/3$ 被阻挡的直接辐射能够转换为漫射辐射。在完全阴云的天气,没有直接日照,到达地球表面