

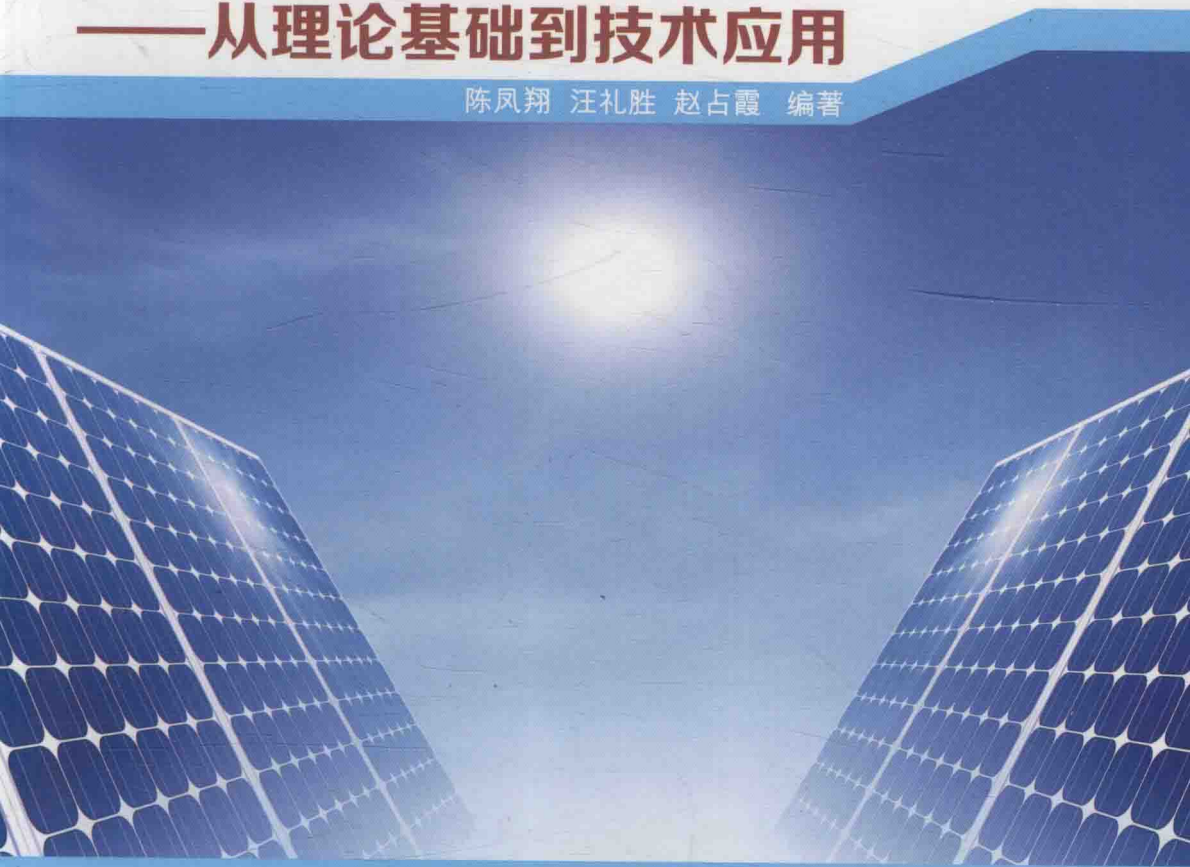


湖北省学术著作出版专项资金资助项目

太阳电池

——从理论基础到技术应用

陈凤翔 汪礼胜 赵占霞 编著



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

太阳电池

——从理论基础到技术应用

陈凤翔 汪礼胜 赵占霞 编著

常州大学图书馆
藏书章

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 简 介

本书在介绍太阳能和太阳电池基本原理的基础上,系统地介绍了太阳与太阳能、太阳电池基本原理、晶体硅太阳电池的制备、薄膜太阳电池、太阳电池的基本测试、太阳电池的模拟技术、新型太阳电池及技术、光伏发电系统的设计及应用等内容,力图向读者提供太阳能光伏技术与应用领域较全面的知识。

本书可作为高等院校的半导体材料与器件、光伏科学与工程领域的高年级本科生、研究生的教材或参考用书,也可作为从事太阳能光伏及相关技术领域的科研人员与工程技术人员的手册。

图书在版编目(CIP)数据

太阳电池——从理论基础到技术应用/陈凤翔,汪礼胜,赵占霞编著. —武汉:武汉理工大学出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-5629-5710-2

I. ①太… II. ①陈… ②汪… ③赵… III. ①太阳能电池-基本知识
IV. TM914. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 315003 号

项目负责人:陈军东 彭佳佳

责任编辑:雷红娟

责任校对:张明华

封面设计:付 群

出版发行:武汉理工大学出版社

地 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://wutp.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

开 本:787×960 1/16

印 张:21.25

字 数:310 千字

版 次:2017 年 12 月第 1 版

印 次:2017 年 12 月第 1 次印刷

定 价:98.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

前 言

太阳能具有充分的清洁性、绝对的安全性、资源的相对广泛性和充足性,是一种具有独特优势和巨大开发利用潜力的能源。太阳电池是从太阳获得能源的主要途径之一,利用太阳电池发电对解决人类能源危机和环境问题具有重要的意义。在过去的 10 年里,全球太阳能光伏电池年产量增长约 6 倍,年均增长 50% 以上。2013 年以来,中国的光伏发电应用进入了快速发展时期,截至 2016 年底,中国光伏发电新增装机容量 3454 万千瓦,累计装机容量 7742 万千瓦,新增和累计装机容量均为全球第一。2020 年,光伏发电装机容量则将可能突破 1 亿千瓦,2030 年突破 4 亿千瓦,这将标志着我国走向光伏技术规模化应用时代。

为适应光伏产业的快速发展,不少高校已开设可再生能源学院或光伏科学与工程专业来加紧培养专业人才,但光伏技术涉及的知识领域非常宽泛,与半导体物理、光学、电子学、化学、材料科学等密切相关,而且太阳电池种类繁多,大部分的专业书籍过于艰深和繁复,不适合刚接触太阳电池领域的初学者。本书从太阳电池的基本原理出发,围绕几种典型太阳电池的性能、制备、测试、仿真及光伏系统设计、应用进行详细阐述,以期帮助读者快速掌握太阳电池的基础理论和技术应用。

全书共分 8 章,由武汉理工大学的陈凤翔博士、汪礼胜博士和上海大学的赵占霞博士共同编著。其中第 1 章由赵占霞撰写,主要介绍了太阳的运动规律及我国太阳能的资源分布。第 2 章由陈凤翔撰写,主要内容为太阳电池的物理基础,包括半导体物理基础知识、太阳电池等效电路及各参数对电池性能的影响、太阳电池的极限效率等,该章为后续章节提供了必要的物理理论基础。第 3 章由赵占霞撰写,主要介绍了晶体硅太阳电池的生长、制备,以及高效晶体硅太阳电池的

发展方向。第4章由汪礼胜撰写,主要叙述了非晶硅薄膜电池、微晶、纳米硅太阳能电池以及碲化镉、铜铟镓硒化合物薄膜太阳能电池。第5章由陈凤翔撰写,系统地介绍了从半导体材料到成品太阳能电池生产过程中的测试工艺、原理和相关的设备。第6章由陈凤翔撰写,重点介绍了在太阳能电池的模拟中常用的几款软件,包括PC1D、Afors-Het、AMPS、SCAPS等,并结合实际应用,给出了有意义的示例。第7章由汪礼胜撰写,介绍了近年来的新型太阳能电池和新技术,包括染料敏化太阳能电池、钙钛矿太阳能电池和在各种太阳能电池中得到广泛应用的表面等离子激元技术。第8章由汪礼胜和赵占霞共同完成,其中汪礼胜撰写第8.1节,主要介绍了太阳能光伏发电系统的组成;赵占霞撰写第8.2~8.4节,介绍了太阳能光伏发电系统设计的一般原则及应用,并对不同地区讨论了光伏发电系统的收益。

我们特别感谢上海交通大学徐林博士,中国科学院上海微系统与信息技术研究所孟凡英研究员,太阳能光伏行业资深技术总监吴浩工程师,南昌大学袁吉仁博士,上海敏皓电力投资有限公司总经理洪紫州先生、副总经理罗培青博士,以及上海交通大学光伏校友会的各位校友在本书撰写过程中提供的各种支持与鼓励。我们也感谢华中科技大学光学与电子信息学院曾祥斌教授、南昌大学光伏研究院周浪院长在本书撰写过程中提出的有益建议。此外,本书的出版工作得到了湖北省学术著作出版专项基金的资助,特此感谢。

本书可作为太阳能电池领域工作者和相关专业学生的参考用书,也可作为从事太阳能光伏行业系统研究、设计和管理等工作的专业技术人员的指导手册。

由于写作时间有限,以及作者的研究经历和知识面的限制,本书难免存在疏漏和不足,敬请读者批评指正。

陈凤翔

2017年5月

目 录

1 太阳与太阳能	1
1.1 太阳的基本参数	1
1.1.1 阳光的来源	1
1.1.2 太阳的结构	1
1.1.3 太阳光谱	3
1.1.4 太阳常数	3
1.2 太阳辐射	3
1.2.1 日地相对运动	3
1.2.2 太阳辐射光谱	5
1.2.3 地表辐照	6
1.3 我国的太阳能资源	9
参考文献	12
2 太阳电池基本原理	13
2.1 半导体物理基础	13
2.1.1 p型和n型半导体	13
2.1.2 p-n结电流电压特性	17
2.1.3 半导体材料的光学特性	31
2.1.4 光电流和光电压	39
2.2 太阳电池的等效电路	47
2.2.1 太阳电池的等效电路模型	47
2.2.2 参数对电池性能的影响	49
2.3 Shockley-Queisser 极限	54
2.3.1 极限效率 $u(x_g)$	55
2.3.2 太阳电池的电流-电压关系	56
2.3.3 额定效率 η_n	59

2.3.4 细致平衡极限	59
参考文献	61
3 晶体硅太阳电池的制备	62
3.1 太阳能级硅材料及晶体硅太阳电池	62
3.1.1 太阳能级硅材料的制备	62
3.1.2 晶体硅太阳电池	63
3.2 硅片的表面处理	65
3.2.1 表面腐蚀	65
3.2.2 表面制绒	71
3.3 p-n 结的制备	75
3.4 减反射膜	76
3.4.1 减反射膜的基本原理	76
3.4.2 宽角度减反射膜的设计	78
3.4.3 宽角度减反射膜的优化	81
3.5 电极制备	85
3.6 高效晶体硅太阳电池	88
3.6.1 SIS 太阳电池	88
3.6.2 PERL 电池	89
3.6.3 IBC 电池	90
3.6.4 HIT 异质结太阳电池	92
参考文献	94
4 薄膜太阳电池	99
4.1 非晶硅太阳电池	99
4.1.1 非晶硅的光学特性	99
4.1.2 非晶硅的电学特性	101
4.1.3 光致衰减效应	104
4.1.4 非晶硅薄膜的红外吸收和拉曼散射	106
4.1.5 非晶硅的制备	110
4.1.6 非晶硅薄膜太阳电池	113
4.2 微晶硅及纳米硅薄膜太阳电池	116

4.2.1	微晶硅生长模型	118
4.2.2	微晶硅的光学特性	120
4.2.3	微晶硅薄膜的结构分析	122
4.2.4	非晶硅/微晶硅叠层太阳电池	124
4.3	化合物薄膜太阳电池	126
4.3.1	碲化镉(CdTe)薄膜太阳电池	126
4.3.2	铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳电池	131
	参考文献	142
5	太阳电池的基本测试	148
5.1	半导体晶向测试	148
5.1.1	X射线衍射法测半导体单晶晶向	149
5.1.2	光点定向	151
5.2	电阻率及薄层电阻测试	153
5.2.1	电阻率测试	153
5.2.2	薄层电阻测试	157
5.3	太阳电池的少数载流子寿命测试	159
5.3.1	光电导衰减法	160
5.3.2	表面光电电压衰减法	162
5.3.3	微波反射光电导衰减法(MWPCD)	165
5.3.4	准稳态光电导衰减(QSSPC)	168
5.4	太阳电池的 $I-V$ 性能测试	170
5.4.1	标准测试条件与太阳能模拟器等级	171
5.4.2	太阳电池的 $I-V$ 测试原理	174
5.4.3	太阳能模拟器特性对测试结果的影响	177
5.5	太阳电池中的缺陷检测	181
5.5.1	发光检测技术	181
5.5.2	EBIC 技术	188
5.6	太阳电池的量子效率和光谱响应	192
5.6.1	量子效率	192
5.6.2	光谱响应	194

参考文献	196
6 太阳电池的模拟技术	201
6.1 半导体器件物理的基本方程	201
6.1.1 光学模拟	203
6.1.2 电学模拟	204
6.2 模拟软件介绍	210
6.2.1 PC1D 软件简介	210
6.2.2 Afors-Het 软件简介	211
6.2.3 AMPS 软件简介	213
6.2.4 SCAPS 软件简介	214
6.3 非晶硅/晶体硅异质结太阳电池的 Afors-Het 模拟	216
6.3.1 本征层对电池性能的影响	218
6.3.2 界面态对电池性能的影响	220
6.3.3 发射区厚度对电池性能的影响	221
6.3.4 背场对电池性能的影响	222
6.4 GaAs 中杂质光伏效应的 SCAPS 软件模拟	225
参考文献	229
7 新型太阳电池及技术	233
7.1 染料敏化太阳电池	233
7.1.1 引言	233
7.1.2 染料敏化太阳电池的基本结构及工作原理	234
7.1.3 染料敏化太阳电池半导体光阳极材料	237
7.1.4 染料敏化太阳电池染料光敏化剂	241
7.1.5 染料敏化太阳电池电解质	244
7.1.6 染料敏化太阳电池对电极材料	245
7.2 钙钛矿太阳电池	246
7.2.1 引言	246
7.2.2 有机金属卤化物钙钛矿的物理结构与特性	247
7.2.3 钙钛矿太阳电池的基本结构及工作原理	249
7.2.4 钙钛矿太阳电池中电荷传输材料	252

7.2.5 电极材料·····	261
7.2.6 有机金属卤化物钙钛矿的合成·····	261
7.2.7 钙钛矿太阳能电池面临的问题与展望·····	263
7.3 表面等离子体激元增强太阳能电池光吸收·····	264
7.3.1 引言·····	264
7.3.2 表面等离子体激元增强光吸收原理·····	265
7.3.3 表面等离子体激元增强太阳能电池光吸收研究进展·····	268
参考文献·····	277
8 光伏发电系统的设计及应用·····	290
8.1 光伏发电系统的组成·····	291
8.1.1 太阳能电池组件·····	291
8.1.2 太阳能电池支架·····	294
8.1.3 蓄电池组·····	297
8.1.4 太阳能充放电控制器·····	303
8.1.5 逆变器·····	308
8.2 光伏发电系统的设计方法·····	312
8.3 光伏发电系统的应用·····	317
8.3.1 太阳能电池组件设计·····	318
8.3.2 光伏控制器设计·····	318
8.3.3 蓄电池组设计·····	319
8.3.4 逆变器的选择·····	320
8.4 光伏发电系统效益分析·····	322
参考文献·····	328

1 太阳与太阳能

1.1 太阳的基本参数

1.1.1 阳光的来源

来自太阳的辐射能对地球的生命是必不可少的,它决定了地球表面的温度,而且提供了地球表面和大气层中自然过程的全部能量。我们生活中所使用的电力,比如水力发电、风力发电、帆船等都是利用由太阳光照引起的水、空气循环的能量。生物质能发电和生物酒精利用的是太阳光照下生长的植物,而太阳能电池则是直接利用太阳光发电的设备。

太阳是位于太阳系中心的恒星,它几乎是热等离子体与磁场交织着的一个理想球体。太阳直径大约是 1.392×10^6 km,相当于地球直径的 10^9 倍;体积大约是地球的 130 万倍;其质量大约是 2×10^{30} kg,是地球的 33 万倍。从化学组成来看,现在太阳质量的大约四分之三是氢,氧、碳、氮、铁和其他的重元素质量少于 2%,剩下的几乎都是氦,太阳采用核聚变的方式向太空释放光和热^[1]。

由太阳的体积和质量,可以计算出太阳的平均密度为 1.409 g/cm^3 ,约为地球平均密度的 26%。太阳表面的重力加速度为 $2.7398 \times 10^4 \text{ cm/s}^2$,约为地球表面重力加速度的 28 倍。太阳表面的逃逸速度约 617.7 km/s ,任何一个中性粒子的速度必须大于这个值,才能脱离太阳的吸引力而跑到宇宙空间中去。

1.1.2 太阳的结构

太阳是一个靠内部核聚变反应产生热量的气体球,它没有像固态行星一样明确的界线,且球体外围的气体密度随着离中心距离的增大

呈指数下降。然而太阳也有明确的结构划分,从内到外主要可以分为三层:核心区、辐射层、对流层(图 1-1)。对流层之外就是太阳的大气层,由光球、色球和日冕三层构成。一般定义太阳的半径就是从它的中心到光球边缘的距离。

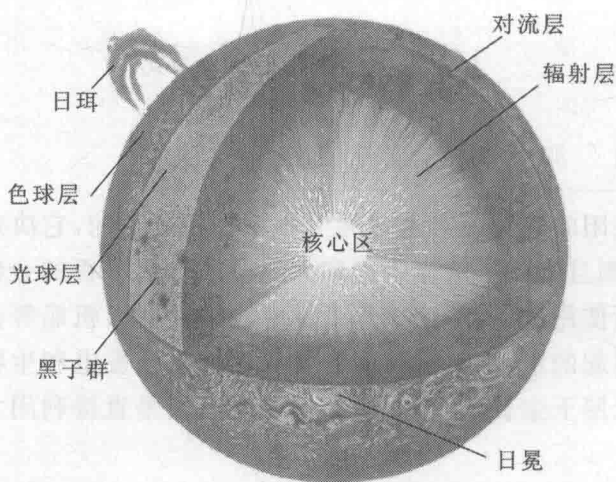


图 1-1 太阳的内部结构

太阳核心是太阳唯一能进行核聚变而产生巨大能量的区域,其温度高达 4×10^6 K。热核反应释放的能量先后通过辐射和对流向外转移,温度也随之降低。能量到达光球层后,重新向外辐射,我们平时眼睛看到的其实就是太阳的光球层。整个光球层厚度在 500 km 左右,与约 70 万 km 的太阳半径相比,光球层的厚度很小。光球层的温度在 6000 K 左右,太阳的光和热几乎全是从这一层辐射出来的,因而可以说太阳的光谱实际上就是光球的光谱。

太阳自身也在不断地运动和变化,如太阳表面有黑子(温度较低的区域)和耀斑(温度较高的区域)活动。太阳黑子的活动周期大约是 11 年,活跃时会对地球的磁场产生影响,严重时会对各类电子产品和电器造成损害。除了太阳活动相对强度的变化外,太阳、地球的相对位置也在时刻变化着。

1.1.3 太阳光谱

太阳光谱强度从 300 nm 左右开始增大,在 500 nm 左右达到最大值,之后在很大范围内,光谱强度随着波长的增大上下波动,并逐渐减弱。肉眼能看到的光称为可见光,其波长范围为 380~780 nm。波长小于 380 nm 的光称为紫外线,肉眼看不见;波长大于 780 nm 的光称为红外线,肉眼也看不见。

由此可见,太阳放射出来的光不仅包括肉眼可以看见的可见光,也包括肉眼看不见的红外线和紫外线。它们两者的比例大致为:可见光占 52%,红外线占 42%,紫外线占 5%~6%。由此可知,有接近一半的太阳光是肉眼看不见的。

将可以吸收不同波长的半导体叠加在一起,最大限度地提高太阳光的利用效率,进而提高太阳光能有效利用率的多结串联太阳电池是目前研究开发的热点之一。

1.1.4 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功率基本上为常数。这个辐射强度称为太阳常数,或称此辐射为大气质量(Air Mass, AM)为零的辐射。

目前,在光伏工作中采用的太阳常数值是 1.353 kW/m^2 ^[2],这个数值是由装在气球、高空飞机和宇宙飞船上仪器的测量值加权平均而确定的。

1.2 太阳辐射

1.2.1 日地相对运动

地球近似为一个圆球,地球上任意点的位置可以用地理坐标的经度和纬度来表示。地球自转轴和地球表面的交点是地球的南极和北极,通过地球地心所作的垂直于自转轴的大圆是地球的赤道,通过地

面一点平行于赤道的小圆称为纬度圆,该点铅垂线和赤道面的夹角便是地理坐标的纬度,自赤道向两极各分为 90° ,分别称为北纬和南纬。通过南、北极垂直于赤道的大圆称为经度圆。全世界的地理坐标经度,以英国伦敦格林尼治天文台所在的子午线为经度的零度线,向东分 180° ,称为东经,向西分 180° ,称为西经。上面这些定义称为地理坐标,下面我们再介绍一下天球坐标。

天球坐标中所谓的天球,就是人们站在地球表面,仰望天空,平视四周,向无限远处望去所确定的假想球面,太阳就像是在这个球面上周期运动着一样。用天球坐标可以确定太阳的位置变化。地球中心即为天球中心,地轴延长线与天球相交之点称为天极,此轴线称为天轴。与天轴垂直的大圆称为天赤道,也就是地球赤道的扩大^[3]。

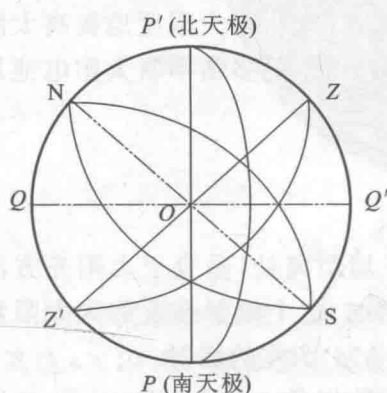


图 1-2 天球坐标

如图 1-2 所示,通过天极 P 、 P' 和太阳的大圆叫时圈。通过天球球心 O 作一直线与观测点铅垂线重合,它与天球的交点为 Z 和 Z' 。其中 Z 恰好位于观测者的头顶上,称为天顶;和 Z 对应的另一点 Z' ,位于观测者脚底下,称为天底。通过球心 O 与 ZZ' 相垂直的平面在天球上截出的大圆叫作真地平。通过观察者天顶 Z 的大圆,称为地平经圈,它与真地平是互相垂直的。而通过天

顶 Z 和天极 P 的特殊经圈称为子午经圈。

进行太阳能接收装置的设计,必然要涉及太阳的位置变化、日照时间的长短等问题,这其中最关键的一个因素就是太阳赤纬角的计算。赤纬角通常定义为太阳光线与赤道平面间的夹角。一年当中,太阳赤纬角每天都在变化。自天赤道起,向北天极由春分日的 0° 变化到夏至日的 $+23.45^\circ$,向南天极则由秋分日的 0° 变化到冬至日的 -23.45° 。春分和秋分时,其值为 0° ,一年当中的其他时间,其值则在 $+23.45^\circ$ 和 -23.45° 之间做周期性的变化。由于地球轨道运动的复杂性,描述太

阳赤纬角的精确公式也相应比较复杂。

目前通常用于工程上的太阳赤纬角的拟合计算公式中最常用的是以下两个^[4],一个是由 Cooper 提出来的:

$$\delta = 23.45^\circ \sin \frac{2\pi(d+284)}{365} \quad (1-1)$$

另一个是由 P. J. Lunde 提出的:

$$\delta = 23.45^\circ \sin \frac{2\pi(d-80)}{370} \quad (1-2)$$

其中, d 为从一年中的第一天开始的天数。知道了太阳赤纬角的变化情况后,就可以计算出太阳在一年中的任一天任一时间的位置,进而设计出性能良好的太阳能应用组件。

1.2.2 太阳辐射光谱

通常把太阳看成一个绝对黑体,黑体吸收所有入射到其表面的辐射并根据自身温度向外发出电磁辐射。理想黑体的能谱服从普朗克(Planck)分布:

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T}\right) - 1 \right]} \quad (1-3)$$

式中 λ ——电磁波的波长(nm);

T ——黑体的温度(°C);

k ——玻耳兹曼常数;

h ——普朗克常量;

c ——光速(m/s);

E ——单位面积单位波长的功率(W/m²)。

黑体的总辐射功率由单位面积辐射的功率来表示,可以由上式积分而得,结果是 $E = \sigma T^4$, 其中 σ 是斯忒藩-玻耳兹曼常数。黑体辐射分布中有一峰值波长,随着黑体温度的变化而变化,温度越高,峰值波长越短。根据维恩定律, $\lambda_p(\mu\text{m}) = 2900/T$, 其中 λ_p 是辐射能量峰值波长。根据斯忒藩-玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)定律,太阳表面温度接近 6000 K, 因此,其辐射光谱等同于该温度下的黑体辐射。由此可

知,太阳光的峰值波长在 $0.5\ \mu\text{m}$ 左右,在绿光波段。

太阳电池的效率对入射光的功率和光谱的变化十分敏感。为了精确地测量和比较不同地点、不同时间的太阳电池,一个标准的太阳光谱和能量密度是非常必要的。太阳光照射到地球表面时,由于大气层与地表物体的散射、折射,会增加 20% 的太阳光入射量抵达地表上所使用的太阳电池表面,这些能量称之为扩散部分(Diffusion Component)能量,因此,针对地表上的太阳光谱能量有 AM 1.5G (Global)与 AM 1.5D (Direct)之分,其中 AM 1.5G 即包含扩散部分的太阳光能量,而 AM 1.5D 则没有包含。AM 1.5D 表示 AM 1.5 的直射光谱,其近似等于 AM 0 的 72% (18% 被大气吸收,10% 被大气散射)。AM 1.5G 光谱的能量密度接近 $970\ \text{W}/\text{m}^2$,比 AM 1.5D 的高近 10%。然而为了方便起见,实际使用中通常把 AM 1.5G 光谱的能量密度归一化为 $1000\ \text{W}/\text{m}^2$ 。图 1-3 是 AM 0、AM 1.5G 及 AM 1.5D 的光谱辐照度。AM 1.5 曲线中的不连续部分为各种不同大气组分对太阳光的吸收带。

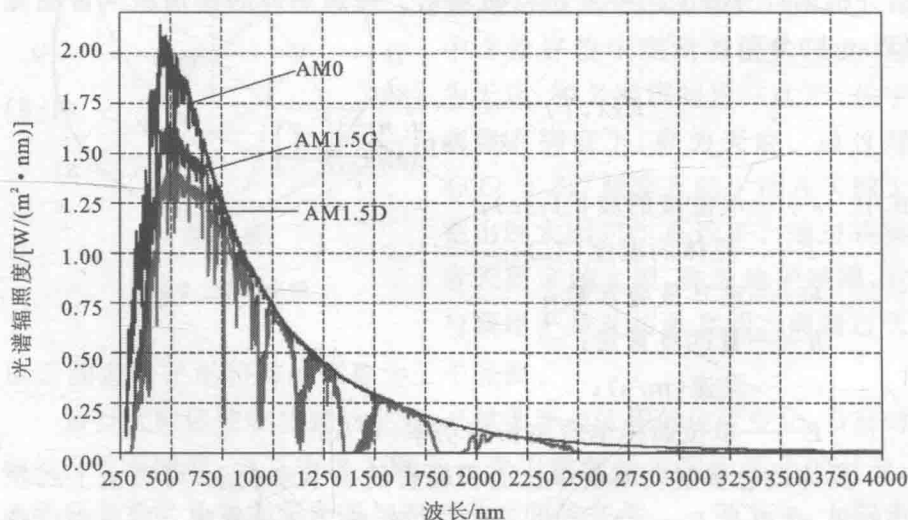


图 1-3 AM 0、AM 1.5G 及 AM 1.5D 的光谱辐照度^[5]

1.2.3 地表辐照

地球的大气层对到达地面的太阳辐射能有很大的影响。首先这

与太阳辐射穿透大气层的距离有关,又取决于太阳辐射的方向,通常用大气质量表示上述情况。但是大气层的影响不仅与太阳光的方向有关,而且还与大气中吸收、散射、反射太阳辐射的物质多少有关。这样一来情况就比较复杂,即太阳辐射能与当时的天气状况密切相关。当然大气层的总体组成成分是相当稳定的,主要有气体氮、氧、氢、氦等,还有成分不固定的气体分子如水汽、臭氧、二氧化碳,以及悬浮的固态微粒如烟、尘埃、花粉等,这些微粒也是形成云的核心。太阳辐射通过大气层时,就被这些分子及微粒所吸收、散射或反射,因而太阳辐照度将被削弱。图 1-4 给出了典型的 AM1 晴朗天空对入射光的吸收和散射。

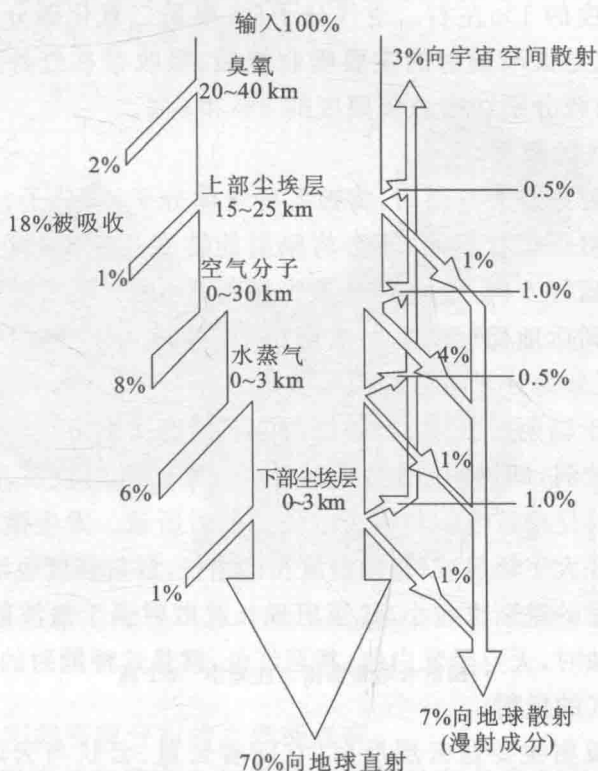


图 1-4 典型的 AM1 晴朗天空对入射光的吸收和散射^[6]