

由河南省科技著作项目资助出版

光伏技术 理论与应用

刘振东 李成波◎编著



中原出版传媒集团
大地传媒

 河南科学技术出版社

光伏技术理论与应用

刘振东 李成波 编著

河南科学技术出版社

· 郑州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

光伏技术理论与应用/ 刘振东, 李成波编著. —郑州: 河南科学技术出版社, 2016. 4

ISBN 978-7-5349-7918-7

I. ①光… II. ①刘… ②李… III. ①太阳能发电-研究
IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 203815 号

出版发行: 河南科学技术出版社

地址: 郑州市经五路 66 号 邮编: 450002

电话: (0371) 65788613 65788624

网址: www.hnstp.cn

策划编辑: 孙 彤

责任编辑: 李晓慧

责任校对: 马晓灿 丁秀荣

封面设计: 杨红科

责任印制: 张艳芳

印 刷: 河南新华印刷集团有限公司

经 销: 全国新华书店

幅面尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 16.25 字数: 400 千字

版 次: 2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

如发现印、装质量问题, 影响阅读, 请与出版社联系并调换。

前 言

能源、经济和环境是人类文明可持续发展的三大课题。自进入 21 世纪以来,随着化石能源的逐渐枯竭,能源短缺、环境恶化成了制约经济可持续发展的因素。因太阳能取之不尽、用之不竭、清洁环保、太阳能电站零污染排放、运行安全可靠等优势,光伏发电被誉为 21 世纪的朝阳产业,成为人们寻找替代能源的首选。越来越多的国家开始实行“阳光计划”,开发太阳能资源,寻求经济发展的新动力,我国也把加快新能源产业发展作为保增长、扩内需、调结构的重要措施,并出台了一系列配套政策,为加快新能源产业的发展营造了良好的政策环境和市场空间。

安阳市属于我国太阳能资源第三类地区,年日照时数为 2 200~3 000h,年辐射量为 5 020~5 860MJ/m²,平均为 5 378.4MJ/m²,太阳能资源较为丰富,适合规模化开发和利用。安阳市是“中国光伏产业示范基地”和“联合国工业发展组织国际太阳能中心光伏产业化与技术研发基地”,在行业内具有较高的知名度和影响力。安阳市拥有较为完整的产业链条,以光伏产业为核心的新能源产业,已被列为安阳市的新兴支柱产业。

近年来,受欧美贸易壁垒、金融危机和反补贴反倾销的“双反”事件的影响,全世界光伏产业行情跌宕起伏,企业破产潮一波接一波,光伏电力价格呈现断崖式降低,趋向“平民式”价格。我国光伏行业未能置身事外,企业经营亦遇到了前所未有的寒冬,产能过剩,多数企业处于停产或半停产状态,行业整合潮流涌动。最近,随着国家光伏产业扶持政策的相继出台,业内人士积极开拓国内外市场,效果显现,光伏行业出现回暖迹象,整体形势有所改善,产业调整和布局持续趋好。在这种背景下,在安阳工学院领导、安阳市科技局和安阳市新能源产业发展中心领导的关怀和大力支持下,结合河南乃至国内光伏发展的实际需要,笔者开始对光伏技术理论和应用进行研究和实践,查阅大量文献资料,记录大量读书笔记,并把心得体会和研究成果编撰成书,在河南省科技著作项目资助下得以出版发行,希望为我国光伏产业的发展尽绵薄之力。在此谨向安阳工学院、安阳市科技局和安阳市新能源产业发展中心的领导、向被查阅的文献作者和单位表示衷心的感谢!

本书重点介绍太阳能光伏发电技术的基本理论、基本知识、基本技能和太阳能电池的

制作工艺，以通俗易懂的语言阐述太阳能光伏系统运行案例和经济环境效益分析、分散式光伏电站维护理论以及发电量的简易计算。本书可作为光伏产业工程技术人员和管理人员的培训用书，也可作为高等院校相关专业的教材使用。由于时间仓促，受编者理论水平和知识视野的局限，书中不当之处在所难免，敬请读者不吝赐教，提出宝贵意见和建议。

光伏行业，功在当代，利在千秋。

编者

2016 年 1 月

目 录

绪论	(1)
第1章 太阳光谱	(2)
1.1 概述	(2)
1.2 描述太阳辐射的几个物理量	(10)
第2章 光伏技术基本理论	(13)
2.1 半导体材料	(14)
2.2 晶体特性	(32)
2.3 晶体七大晶系	(48)
2.4 晶胞参数	(50)
2.5 物相分析	(54)
2.6 影响多晶硅少子寿命的因素	(56)
2.7 太阳能电池材料	(62)
2.8 太阳能电池单晶技术	(72)
2.9 太阳能电池板	(75)
2.10 薄膜电池的制备方法	(77)
2.11 太阳能电池的性能参数	(80)
2.12 太阳能电池组件热斑效应	(90)
第3章 化学法制备多晶硅生产技术	(93)
3.1 改良西门子法技术	(93)
3.2 硅烷法技术	(95)
3.3 流化床法技术	(97)
3.4 多晶硅化学制备法工艺条件及优缺点比较	(99)
第4章 冶金法制备多晶硅生产技术	(103)
4.1 硅材料杂质检测技术	(105)
4.2 工业硅物理除杂法	(108)
4.3 吹气熔炼法提纯多晶硅	(117)
4.4 合金熔炼法提纯多晶硅	(119)
第5章 太阳能光伏发电系统	(122)
5.1 太阳能光伏发电的基本原理	(122)

5.2	太阳能光伏发电系统的组成	(127)
5.3	太阳能电池	(131)
5.4	非晶硅电池	(139)
5.5	逆变器与控制器	(143)
5.6	蓄电池	(144)
5.7	温度对晶硅太阳能电池性能的影响	(149)
5.8	影响太阳能电池光电转换效率的因素	(150)
5.9	太阳能光伏发电系统	(152)
5.10	光伏系统维护	(157)
第6章	晶硅电池的制造工艺	(160)
6.1	硅片切割	(161)
6.2	硅片清洗	(165)
6.3	多晶硅表面的钝化	(173)
6.4	晶硅太阳能电池减反射膜技术	(174)
6.5	晶硅太阳能电池的制绒方法	(176)
6.6	太阳能电池pn结的制备	(178)
6.7	太阳能电池电极的制作	(180)
6.8	电池片边缘的刻蚀	(181)
6.9	太阳能电池最大功率点跟踪	(182)
6.10	电池片的封装与测试	(183)
第7章	薄膜电池的制造工艺	(186)
7.1	非晶硅太阳能电池的制造工艺	(186)
7.2	多晶硅薄膜电池	(191)
7.3	异质结太阳能电池的制备	(194)
7.4	铜铟镓硒薄膜太阳能电池技术	(197)
7.5	光强和温度对多结太阳能电池的影响	(203)
7.6	叠层太阳能电池的优化工艺	(204)
第8章	太阳能路灯	(206)
8.1	太阳能路灯简介	(206)
8.2	太阳能路灯设计	(212)
8.3	风光互补路灯	(221)
第9章	分散式光伏电站发电量简易计算	(224)
9.1	太阳能电池方阵方位角与倾斜角	(224)
9.2	太阳能小屋的设计	(228)
9.3	分散式光伏电站发电量的简易计算	(232)
9.4	光伏组件生命周期的环境评价	(237)
9.5	光伏产业风险分析与对策	(239)
第10章	安阳市并网光伏系统案例经济和环境效益分析	(242)
参考文献		(250)

绪 论

能源是经济发展的重要支撑、动力和制约因素。能源消费与经济增长之间存在相互依赖关系。随着全球气候逐渐变暖、人类生存环境逐渐恶化、化石燃料逐渐减少、温室效应日益突出,积极开展新能源发展研究、加快新能源推广应用步伐,孵化新能源、开发新能源已经成为各级政府必须面对的重大战略问题。

河南是能源匮乏的大省,能源危机已成为经济发展必须面对的一个主要问题。最近几年,随着经济的快速发展和人们生活水平的持续提高,能源缺口越来越大。河南要实现中部崛起,就必须突破能源发展瓶颈的制约。从河南的经济发展现状和能源生产情况出发,制订适合于河南实际情况的能源发展战略具有重要的现实意义。

河南地处中原,煤、石油储量有限,且逐渐枯竭。日本福岛核电站事故给人们和平利用核能投下了阴影。河南水资源匮乏,地热能、风能也不丰富,显然,利用这些能源有先天之不足。而河南位于太阳能资源第三类地区,太阳能资源相对比较丰富。太阳能取之不尽、用之不竭、清洁环保、零排放、安全可靠,无须架设输电线路即可就地发电供电,光伏电站建设周期短,维护简便,太阳能应该是河南发展新能源战略的首选能源。

光伏电站是利用光伏组件将太阳能直接转化为电能的装置。光伏发电系统分为独立(离网)光伏发电系统和并网光伏发电系统。安阳市拥有硅料、硅锭、硅片、电池片、电池组件(电池板)及控制器、逆变器、储能设施(蓄电池)的生产与研制以及工程应用系统、发电系统检测标准的设计等较为完整的产业链条。本书试着采用产业技术路线图的方法研究太阳能光伏发电技术在安阳市的推广应用,明确经济社会发展需要、技术研发以及市场实现之间的关系,实现合理有效配置产业链和社会资源,促进科技与经济的结合,为安阳市乃至河南制订能源发展战略提供科学理论依据。

本文通过对影响太阳能电池转换效率因素的分析,多晶硅的提纯,结合实例阐述提高太阳能电池转换效率的方法。指出从太阳能电池材料制备、太阳能电池片生产工艺两个方面阐述降低光伏发电成本,提高太阳能电池发电效率的措施,为经济建设服务。

第1章 太阳光谱

1.1 概述

一、太阳常数

太阳是太阳系中唯一的会发光的恒星，它源源不断地把光和热送给地球，使地球表面的生物生长、运动和生命繁衍。煤、石油、天然气等是地质历史时期生物固定以后积累下来的太阳能。太阳辐射是地球表层能量的主要来源。地球在围绕太阳公转的同时，每时每刻都在不停地自转，形成了日、夜和四季。太阳是太阳系的中心天体，太阳系质量的99.86%都集中在太阳体内。太阳系中的八大行星（按照离太阳的距离从小到大的顺序依次为水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星）、小行星、流星、彗星、外海王星天体以及星际尘埃等，都围绕着太阳公转。而太阳则围绕着银心（银河系的中心）公转。

按照由里往外的顺序，太阳是由核心、辐射区、对流层、光球层、日冕层构成的。光球层之下称为太阳内部；光球层之上称为太阳大气。太阳的中心温度高达 $1.92 \times 10^8 \text{ K}$ ，表面温度为 $5.77 \times 10^3 \text{ K}$ 。由于温度太高，太阳上的所有物质都处于等离子状态，太阳几乎是热等离子体^①与磁场交织在一起的理想球体，其直径大约是 $1.392 \times 10^6 \text{ km}$ ，相当于地球直径（ $1.25 \times 10^4 \text{ km}$ ）的109倍。

太阳对地球的各种影响活动都在太阳大气里进行，我们所见到的太阳可见光几乎全是由光球发出的。色球层是一个充满磁场的等离子体层，能发射大量的远紫外辐射、X射线辐射、高能粒子流等射线，这些辐射严重影响日地空间和地球高层的大气。日冕层是太阳大气的最外层，带电粒子数密度为 10^{15} m^{-3} ，这些带电粒子运动速度极快，以致不断有带电的粒子挣脱太阳的引力束缚，射向太阳的外围，形成太阳风。太阳大气由90多种化学元素组成，其中氢的含量最多，约占太阳质量的71%，氦约占27%，其他元素包括钠、钙、铁、氧等约占2%。

太阳的寿命大致为100亿年，目前大约已经45.7亿年（地球大约45.4亿年）。太阳本身就是一个超大的核聚变反应堆，能将氢原子（自然界中的氢以氕 ^1_1H 、氘 ^2_1H 、氚 ^3_1H 三种同位素的形式存在）聚变为氦原子，如图1.1所示。核聚变反应的方程式为： $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n} + \Delta E$ ， ΔE 是核聚变产生的能量。每秒能将 $6.57 \times 10^{11} \text{ kg}$ 的氢原子聚合生成 $6.53 \times$

^① 等离子体又叫作电浆，是由部分电子被剥夺后的原子及原子团被电离后产生的正负电子组成的离子化气体状物质，它广泛存在于宇宙中，常被视为是除去固态、液态、气态外，物质存在的第四态。

10^{11} kg 的氢原子，同时将损失的 $4.00\times 10^9\text{ kg}$ 核物质连续转化成 $3.6\times 10^{26}\text{ J}$ 的能量^①，生成中微子^②和太阳辐射。

由于地球在沿一椭圆轨道围绕太阳公转的同时，每天绕着“地轴”自西向东自转一周，角速度 ω 为 $15^\circ/\text{h}$ ，周期 T 为 $23\text{ h } 56\text{ min } 4.009\text{ s}$ （平太阳时），导致地球上昼夜分明。地球除自转外，还循着偏心率（椭圆两焦点间的距离和长轴长度的比值）为 $0.016\,722$ 的椭圆轨道每年绕太阳运行一周。地球公转周期为 $365\text{ 天 } 6\text{ h } 9\text{ min } 9.5\text{ s}$ ，太阳位于地球公转椭圆轨道的一个焦点上，所以太阳到地球的距离（日地距离）是随时间（也就是随地球在公转椭圆轨道上的位置）的不同而有所差异，如表 1.1 所示。表 1.2 为太阳物理特性参数与地球物理参数的比较。

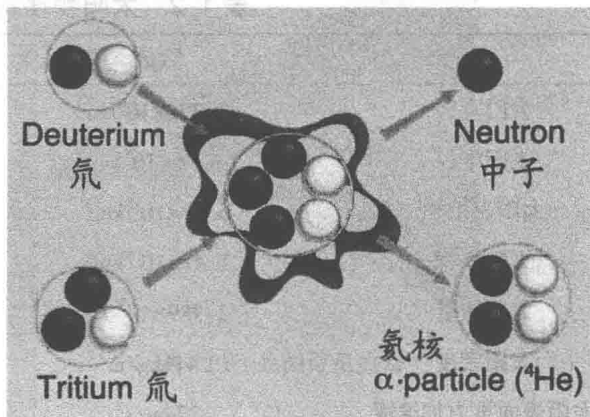


图 1.1 太阳核聚变反应

地球自转轴与地球围绕太阳公转时的公转轴呈 $23^\circ 27'$ 的夹角，且地球自转轴的指向不变，总是指向地球的北极。地球处于公转轨道的不同位置时，太阳光投射到地球上的方向也就不同，于是形成了地球上的四季变化。每天中午时分，太阳的高度总是最高。在热带低纬度地区（在南北纬度 $23^\circ 27'$ 之间的地区），一年中太阳有两次垂直入射，在较高纬度地区，太阳总是靠近赤道方向。在南北半球 $90^\circ \sim 23^\circ 27'$ ，冬季太阳低于地平线的时间长，而夏季则高于地平线的时间长。

表 1.1 某观测年日地距离随日期的变化

日期	日地距离/m
1 月 2 日	1.470×10^{11}
4 月 2 日	1.495×10^{11}
7 月 2 日	1.520×10^{11}
10 月 2 日	1.495×10^{11}

日地平均距离为 $1.495\,978\,7\times 10^{11}\text{ m}$ ，日地最远距离为 $1.521\,0\times 10^{11}\text{ m}$ ，日地最近距离为 $1.470\times 10^{11}\text{ m}$ ，地球远日点与近日点距离相差约为 $5\times 10^9\text{ m}$ 。太阳活动周期为 11.04 年 。日地距离时刻在变化，每年 1 月 2 日至 5 日经过近日点，7 月 3 日至 4 日经过远日点。赤道上四季白昼长度均为 12 h ，赤道以外昼夜长度随四季变化，纬度 23.5° 的春分、秋分日

① 1905 年，伟大的物理学家爱因斯坦提出一个理论：物质的质量和能量可以互相转化，即质量可以转化成能量， $\Delta E = mc^2$ ， ΔE 表示能量，单位为焦耳 (J)， m 表示质量，单位为千克 (kg)， c 表示光的传播速度 $3.0\times 10^8\text{ m/s}$ ，能量也可以转化成质量，并且不违反能量守恒定律和质量守恒定律。

② 中微子是轻子的一种，是组成自然界的最基本的粒子之一，常用符号 ν 表示。中微子不带电，质量小于电子质量的百万分之一，以接近光速运动。

昼长度均为 12h，夏至和冬至日昼长度分别为 14h 51min 和 9h 09min，到纬度 66°33′出现极昼和极夜现象。南北半球的冬夏季节时间正好相反。

表 1.2 太阳物理特性参数

	数值	与地球相比
太阳直径	$1.392\times10^6\text{km}$	是地球直径的 109 倍
太阳半径	$6.96\times10^5\text{km}$	是地球半径的 109 倍
太阳表面积	$6.09\times10^{12}\text{km}^2$	是地球表面积的 11 934 倍
太阳体积	$1.41\times10^{27}\text{km}^3$	是地球体积的 1.3×10^6 倍
太阳质量	$1.989\times10^{30}\text{kg}$	是地球质量的 3.334×10^5 倍
太阳密度	$1\,411\text{kg/m}^3$	是地球密度的 0.26 倍
太阳表面重力加速度	274m/s^2	是地球表面重力加速度的 27.9 倍
太阳到地球的平均距离	$1.5\times10^8\text{km}$	
太阳表面温度	5 777K	
太阳中心温度	$1.57\times10^7\text{K}$	
发光度	$3.827\times10^{26}\text{J/s}$	
纬度 30°自转周期	28d 4h 48min	
纬度 60°自转周期	30d 19h 12min	

太阳辐射在大气上界的分布是由地球的天文位置决定的。除太阳本身的变化外，天文辐射能量主要取决于日地距离、太阳高度角和昼长。

恒星辐射的能量与其辐射光谱波长有密切关系。根据普朗克黑体辐射定律（1900 年，Planck’s Blackbody Radiation Law）：黑体的单色（波长 λ ）辐出度 $M_{\lambda_0}(T)$ 与辐射波长

λ 、黑体温度 T 之间的关系 $M_{\lambda_0}(T) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}$ ，黑体在一定温度 T （绝对温度）下

的总辐射度（沿辐射方向、单位面积、单位立体角上的辐射能量，单位为 $\text{W} = \text{J/s}$ ）

$M_0(T) = \int_0^\infty M_{\lambda_0}(T) \cdot d\lambda$ ，其中玻耳兹曼常数 $k = 1.380\,650\,5 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ，普朗克常数 $h =$

$6.626\,069\,3 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ，J 为热量单位焦耳，s 为时间单位秒。太阳辐射量亦可以由以日地距离为半径的球体表面积乘以太阳常数（后面介绍）的积计算，由此推测太阳表面温度大约为 5 770K。根据氢核聚变反应堆原理推测太阳中心温度大约为 $1.92 \times 10^8 \text{K}$ 。根据斯特藩-玻耳兹曼（Stefan-Boltzmann）光辐射定律：黑体单位时间辐射的能量 ΔE 正比于其绝对温度 T （单位为 K）的四次方： $\Delta E = \sigma T^4$ ，其中斯特藩-玻耳兹曼常数 $\sigma = 5.669\,7 \times 10^{-8} \text{W/K}^4 \cdot \text{m}^2$ ，太阳辐射的总功率 $\Phi_s = 4\pi r_s^2 \cdot \sigma T^4 = 3.8 \times 10^{23} \text{kW} \text{ (J/s)}$ ，其中 T 为太阳的表面温度。太阳大约以 $3.8 \times 10^{23} \text{kW} \text{ (J/s)}$ 的功率时刻不停地以电磁波的形式向空间释放能量。太阳辐射的电磁波峰值波长是 $0.475\mu\text{m}$ ，属于蓝色光。

人眼视网膜上有大量杆状细胞和锥状细胞。杆状细胞能敏感地觉察太阳光线的明暗程度，对色彩分辨迟钝；锥状细胞既能区分光线的强弱，又能分辨光线的颜色。人眼能分辨

的颜色有 1 200 多种。在可见光谱的波长范围内,人眼对不同波长的电磁辐射产生的颜色感觉不同。一束白色光经过棱镜可以色散出七色彩带(红、橙、黄、绿、青、蓝、紫)。光的颜色由光的波长决定,光的波长单位为 nm,紫色光的波长范围为 405~400nm。人眼对太阳光谱峰值波长的蓝色光(波长 0.45~0.52 μm)和绿色光(0.52~0.56 μm)不太敏感,所以太阳看起来呈现出黄色或红色。常见光谱的波长范围如图 1.2 和表 1.3 所示。

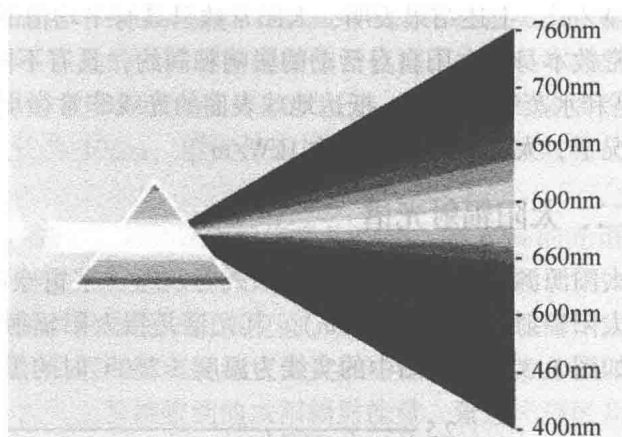


图 1.2 太阳可见光谱

表 1.3 不同颜色的波长及其光谱范围

颜色	波长/nm	光谱范围/nm
红	700	640~750
橙	620	600~640
黄	580	550~600
绿	510	480~550
蓝-靛	470	450~480
紫	420	400~450

虽然地球远日点与近日点距离相差约 $5 \times 10^9 \text{m}$,但是与日地之间的平均距离 ($1.495\,978\,7 \times 10^{11} \text{m}$) 相比,只有 $\pm 3.3\%$ 的变化,这种变化引起的太阳对地球大气上界(距地球 2 000~3 000km)的辐射量的变化也仅有 $\pm 6.7\%$ 。此外,太阳本身的活动^①也会引起太阳辐射量的波动。多年来在世界各地的观测结果表明,太阳活动峰值年比太阳活动宁静年的辐射量最大增加 2.5%。因此,在一般情况下,可以认为太阳辐射量是比较稳定的,从而提出了“太阳常数”这一概念。

所谓太阳常数(solar constant),是指在日地平均距离处垂直于太阳光线的平面上,在单位时间内单位面积上所接收到的太阳辐射能,单位为 W/m^2 。1957 年,国际辐射委员会(International Radiation Commission, IRC)确定太阳常数为 $1\,384 \text{W}/\text{m}^2$ 。随着科学技术和测量技术的不断提高,太阳常数的观测值也越来越精确。地球接收的太阳能哪怕只有千分之一的变化,只要是持续不断的,也会对天气、气候产生重要影响。近年来,人们利用人造卫星、火箭、高空气球、航天器等现代高科技手段和光强计观测的太阳常数为

① 太阳活动:指太阳释放能量的不稳定性所导致的一些自然现象。当太阳黑子和耀斑增多时,其发射的电磁波进入地球大气层、甚至到达地球表面,扰乱大气层,干扰无线电短波通信,甚至使其中断。太阳活动产生的高能带电粒子流扰乱磁场,产生“磁暴”。高能带电粒子流与两极高空大气碰撞产生极光。太阳活动影响自然灾害(地震、水灾、旱灾等)的发生。

1 357W/m²。上述结果表明，太阳常数只具有平均值的意义，而非通常意义下的“常数”。太阳常数本身受太阳自身活动的影响和制约，具有不同时间尺度的变化。太阳辐射经过大气层^①和水蒸气吸收后，抵达地球表面的光线非常微弱，在天气晴朗且太阳运行接近天顶的情况下，太阳辐射强度约为 1kW/m²。

二、太阳辐射光谱

太阳源源不断地以电磁波的形式向四周（宇宙空间）放射能量（电磁波和粒子流），称为太阳辐射（solar radiation）。其光谱是指太阳辐射经色散分光后按波长大小排列的图谱，如图 1.3 所示。图中的实线为温度 5 250℃时的黑体辐射曲线。

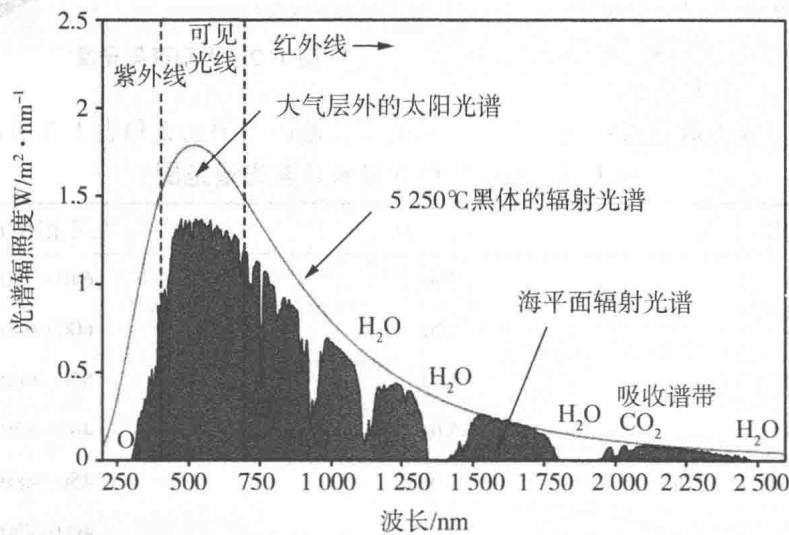


图 1.3 太阳辐射光谱

太阳辐射光谱有 γ 射线（波长短于 0.2Å），X 射线（波长 0.01~10nm），紫外线（约占 7%，波长 0.15~0.4 μ m），可见光线（约占 50%，波长 0.4~0.76 μ m，颜色呈红、橙、黄、绿、青、蓝、紫），红外线（约占 43%，波长 0.76~4 μ m）等，峰值能量在波长 0.475 μ m 处。太阳辐射遵从麦克斯韦方程组，是物质波的一种形式，既具有波动性，也具有粒子性，与无线电波没有本质差异，只是波长和频率不同而已。自然界中的物体温度越高，其辐射波的能量亦越大，波长亦越短，射线频率亦越高。光的波长与能量之间的关系： $\Delta E=hf$ ，其中 f 为辐射光的频率， ΔE 为辐射光的能量 [单位为焦耳 J]，普朗克常数 h 约为： $h=6.626\ 069\ 3\times10^{-34}$ J·s，时间的单位为秒 s。

太阳辐射波以短波为主，能量巨大。太阳以每秒 400 万 t 的速度损失质量，变成能量射向宇宙空间。虽然地球可以接收到的能量（约为 8.1×10^{13} kW）只占太阳辐射能量的 22 亿分之一，但每分钟仍可以得到相当于 4 亿 t 烟煤的热量，所以太阳辐射对地球和人类的影响非常巨大。太阳在 45.7 亿年的漫长时间内只消耗了其质量的 0.03%，我们看见的太阳正值稳定、旺盛的中年期，不必担心太阳的寿命，关于地球即将毁灭的谣传显然是谬论。

① 大气层主要成分：氮气占 78.1%，氧气占 20.9%，氩气占 0.93%；还有少量的二氧化碳、稀有气体（氦气、氖气、氩气、氪气、氙气、氡气）。

物体辐射能力的强弱,取决于其温度本身的高低。太阳辐射的光学频谱类似于温度为 5 770K 的黑体辐射。地球大气上界 99% 以上的太阳辐射光谱波长范围在 $0.15 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 。

由于地球表面温度 (300K) 远小于太阳表面温度 (5 777K), 地球辐射的主要能量集中在波长 $1 \sim 30 \mu\text{m}$, 最大辐射平均波长为 $10 \mu\text{m}$, 属红外区域。与太阳短波辐射相比, 地面辐射为长波辐射 ($3 \sim 120 \mu\text{m}$)。

太阳辐射通过大气层后, 其强度和光谱能量分布都将发生变化, 有 47% 的光谱到达地面, 称为直接太阳辐射; 23% 的光谱被大气中的分子、微尘、水汽等所吸收, 30% 被大气物质散射和反射。被散射的太阳辐射一部分返回宇宙空间, 另一部分到达地面, 到达地面的这部分光线被称为散射太阳辐射。散射太阳辐射和直接太阳辐射之和称为总辐射。

到达地面的太阳辐射能量远小于大气上界接收到的太阳辐射能量, 紫外光谱区几乎绝迹, 可见光谱区减至 40%, 而红外光谱区增至 60%。如果紫外线没有被大气层或者其他保护装置所吸收, 将会影响人体皮肤色素的变化。在室温下, 晶硅禁带宽度约为 1.14eV, 因此必须是波长小于 1100nm 的光线^①才可以使晶硅产生光电效应。

在夜间, 来自地球表面的红外辐射大部分传到了外空。这些来自于自然或人为产生的温室气体 [如水蒸气 (H_2O)、二氧化碳 (CO_2)、氧化亚氮 (N_2O)、甲烷 (CH_4) 和臭氧 (O_3)] 在大气上层积累, 会使大气吸收太阳辐射的能力增加, 从而导致全球气候变暖。云层能强烈吸收和散射太阳辐射, 同时还强烈吸收地面反射的太阳辐射。云层平均反射系数为 $0.50 \sim 0.55$ 。一年中由于日地距离的变化所引起太阳辐射强度的变化不超过 3.4%。

虽然近年来臭氧层的破坏没有太多导致太阳辐射对地球表面的影响, 但温室气体会增大散射辐射, 影响太阳光谱对太阳能电池板发电的作用。

在地球大气上界, 北半球夏至时, 日辐射总量最大, 从极地到赤道分布比较均匀; 冬至时, 北半球日辐射总量最小, 极圈内为零, 南北差异最大。南半球情况正好相反。春分和秋分时, 日辐射总量的分布与纬度的余弦成正比。南、北回归线之间的地区, 一年内日辐射总量有两次最大, 年变化率小。纬度愈高, 日辐射总量变化率愈大。

在地球表面上, 全年太阳辐射总量的分布基本上呈带状, 只是在低纬度地区发生变化。在赤道地区, 由于处在热带低压控制下, 天空多云, 常年高温多雨, 形成热带雨林或者草原气候, 晴天少、雨天多, 全年太阳辐射总量并不是最高。在南北半球的副热带高压地区, 因为是高原盛行气流下沉, 全年干旱少雨, 形成热带沙漠气候, 特别是在大陆荒漠地区, 全年太阳辐射总量较大, 最大值在非洲东北部的摩洛哥、阿尔及利亚、突尼斯、利比亚和埃及。阿尔及利亚太阳年辐射总量为 $0.972 \times 10^4 \text{MJ/m}^2$, 埃及太阳年辐射总量为 $1.008 \times 10^4 \text{MJ/m}^2$, 摩洛哥太阳年辐射总量为 $0.936 \times 10^4 \text{MJ/m}^2$ 。

太阳辐射的时空变化特点如表 1.4 所示: ①全年以赤道获得的辐射能量最多, 极地最少。这种热量不均匀分布, 导致地球表面各纬度地区气温的差异, 在地球表面出现热带、

① 光线的波长越短, 光线光子的能量越大, $\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$, λ 是光线波长, 普朗克常数 $h = 6.626\,069\,3 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$, 光速 $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

温带和寒带气候；②太阳辐射夏天大、冬天小，导致夏季温度高、冬季温度低。太阳辐射总量与日照时间成正比。日照时间的长短，随纬度和季节而变化。

表 1.4 北半球的太阳辐射总量 单位：J/cm²

纬度/°	夏半年（4~10月）	冬半年（11~3月）	全年
0	657 806.6	657 806.6	1 315 613.2
5	679 417.2	631 848.8	1 311 266
10	696 179	601 376.6	1 297 555.6
15	708 092	566 766.2	1 274 858.2
20	717 413.4	528 352	1 243 466.4
25	717 413.4	486 552	1 203 965.4
30	714 612.8	441 575.2	1 156 188
35	707 256	394 048.6	1 101 304.6
40	695 217.6	344 223	1 039 440.6
45	678 999.2	292 892.6	971 891.8
50	658 935.2	240 642.6	899 577.8
55	636 154.2	188 852.4	825 006.6
60	610 698	137 731	748 429
65	585 785.2	90 873.2	676 658.4
70	568 187.4	55 050.6	623 238
75	557 737.4	30 221.4	587 958.8
80	551 049.4	13 292.4	564 341.8
85	547 245.6	3 051.4	550 297
90	546 033.4	0	546 033.4

大气层对太阳辐射的削弱作用包括大气层对太阳辐射的吸收、散射和反射。大气层中各种成分对太阳辐射的吸收具有选择性。太阳辐射经过整层大气时，0.29μm 以下的紫外线几乎全部被吸收，对可见光区吸收极少，对红外区有多个吸收带，最强的吸收带在0.93~2.85μm。

大气上界的太阳辐射是由地球的天文位置决定的，故又称天文辐射。天文辐射的分布和变化不受大气影响，主要决定于日地距离、太阳高度角和日昼长度。太阳辐射随季节变化呈现有规律的变化，形成四季分明。

太阳高度角愈大，太阳辐射强度愈大。因为同一束光线，直射时，照射面积最小，单位面积所获得的太阳辐射能量最多；反之，斜射时，照射面积大，单位面积获得的太阳辐射能变少。太阳高度角有日变化和年变化之分。太阳高度角越大，则太阳辐射越强。就全球平均而言，到达大气上界的太阳辐射只占太阳总辐射的 45%。总辐射量随纬度升高而减小，随太阳高度角的升高而增大。一天内，中午前后太阳辐射量最大，夜间为 0；一年

内太阳辐射总量夏天大、冬天小。

太阳高度角因时、因地而异。一日之中，太阳高度角正午大于早晚，夏季大于冬季，低纬度地区大于高纬度地区。

太阳辐射的强弱用辐射强度表示，单位是 $\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ，其中 J 是光的能量单位焦耳，即在单位时间内（每分钟）垂直投射到单位面积上的太阳辐射能量。入射光功率 $925 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ ，相当于晴朗夏日在海平面上所承受的太阳光。

地球上获得的太阳辐射强度与日地距离的平方呈反比。地球位于近日点时，获得太阳辐射大于远日点。据研究，1月初（1月4日）地球通过近日点时，地表单位面积上平均获得的太阳辐射比7月初（7月4日）通过远日点时多7%。

大气辐射的方向既有向上的，也有向下的。大气辐射中向下的那一部分，刚好和地面辐射的方向相反，所以地面辐射称为大气逆辐射。大气辐射是地面获得热量的重要来源。由于大气辐射的存在，使地面实际损失的热量比地面以长波辐射放出的热量少一些，大气的这种保温作用称为大气的温室效应。大气的这种保温作用使近地表的气温提高了约 18°C 。

影响太阳辐射强度的因素：

（1）太阳高度角或赤纬度。太阳高度角越大，穿越大气的路径越短，大气对太阳辐射的削弱作用就越小，则到达地面的太阳辐射就越强；太阳高度角越大，等量太阳辐射散布的面积就越小，太阳辐射就越强。例如，中午的太阳辐射强度比早晚的强。

（2）海拔高度。海拔越高空气越稀薄，大气对太阳辐射的削弱作用就越小，则到达地面的太阳辐射就越强。例如，青藏高原是我国太阳辐射最强的地区。

（3）天气状况。晴天云少，对太阳辐射的削弱作用就小，到达地面的太阳辐射就强。例如四川盆地多云雾阴雨天气，太阳辐射削弱多，四川盆地成为我国太阳辐射量最低的地区。

（4）大气透明度。大气透明度高则对太阳辐射的削弱作用小，使到达地面的太阳辐射强。

（5）白昼时间的长短，日地距离，地球在公转轨道的位置。地球位于近日点时获得的太阳辐射大于远日点。太阳辐射强度与日照时间成正比。

（6）大气污染的程度。污染重，则对太阳辐射削弱强，到达地面的太阳辐射少。

（7）地形、地貌及障碍物的影响。当太阳斜照时，高大的山峰、树林会遮住太阳，房屋、烟囱等建筑物亦会挡住阳光。

太阳能电池不能把任何一种光都同样地转换成电，例如荧光灯这样的室内光源就无法有效地进行光电转换，只有光子能量大于电池材料禁带宽度的光子才有可能在电池材料中产生电子-空穴对。光强和光谱的不同，会引起太阳能电池输出的变动。

三、大气质量

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, AM）。到达地面的太阳辐射主要受大气层厚度的影响。大气层越厚，对太阳辐射的吸收、反射和散射就越严重，到达地面的太阳辐射就越少。此外大气的状况和大气的质量对到达地面的太阳辐射也有影响。显然太阳辐射穿过大气层的路径长短与太阳辐射的方向有关。

大气质量具体表述为太阳辐射穿过地球大气的路径与太阳在天顶方向垂直入射时的路径之比,通常用符号 m 表示,并规定标准大气压和 0°C 时海平面上太阳垂直入射到单位面积上的太阳光谱能量,大气质量 $m=1$,记为 AM1。不同气象条件下到达地面的太阳辐射强度是不相同的。

地球大气层外接收到的太阳辐射,未受到大气层的反射和吸收,称为大气质量为 0 的辐射,以 AM0 表示。

太阳辐射在到达地球之前,被大气层中的气体分子及悬浮微粒所吸收、散射和反射而能量被削弱,这种削弱作用与光线穿透大气层的距离有关,光线穿透大气层的距离决定于太阳辐射的方向。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。

AM1.5、AM2 等分别表示不同方向上得到的太阳光谱。AM1.5 = 光线在大气中走的路程/垂直路程。

大气质量与太阳光入射角之间的关系: $\text{AM} = 1/\cos\theta$, θ 表示太阳光入射角。当 $\theta = 48.2^{\circ}$ 时,大气质量为 AM1.5,是指晴天时太阳光照射到一般地面的情况,其辐射总量为 $1\text{kW}/\text{m}^2$ 。这个标准常用于测试太阳能电池组件效率。

1.2 描述太阳辐射的几个物理量

太阳能是一种能流密度低、在地球表面辐射具有间歇性,空间分布又不断变化的能源,与常规能源有很大的区别,这就对太阳能的收集和利用特别是对中高温时太阳辐射的利用提出了更高的要求。为有效提高太阳能电池单位面积太阳辐射能量的收集和利用,需要了解描写太阳辐射的几个物理量——太阳时、太阳时角、赤纬角、方位角和太阳高度角等概念,因为它们是决定地球表面获得太阳热能数量的最重要参数。

一、太阳时 (t_s)

太阳时 (solartime) 是以地球绕太阳公转为依据定出的计时方法。太阳时分为真太阳时和平太阳时。平太阳时是假设地球绕太阳公转轨迹为圆形轨道,地球在公转的同时绕自身地轴均匀自转,每自转一周,计 24h,太阳经过某地子午线(为测量地球而假设的南(午)北(子)方向的线,即通过地面某点的经度线)的那一瞬时规定为中午 12 点整,以此为标准定出的时间计时方法。如果考虑地球绕太阳运行的轨道是椭圆形的,地球相对于太阳的自转并不是均匀的,每天运转时间不都是 24h,有时候少,有时候多,这种计时方法称为真太阳时,也就是太阳连续两次经过当地经度线的实际时间。太阳时是计算太阳高度角、方位角和入射角等物理量的基础。

日常生活中为了计算方便,采用平太阳时作为计时方法,也就是平常钟表所指的时间。在我国统一采用东经 120° 经线圈上的平太阳时作为全国的标准时间,即“北京时间”。东经 120° 经线圈从北往南依次经过我国内蒙古、辽宁、山东、江苏、安徽、浙江、福建和台湾。