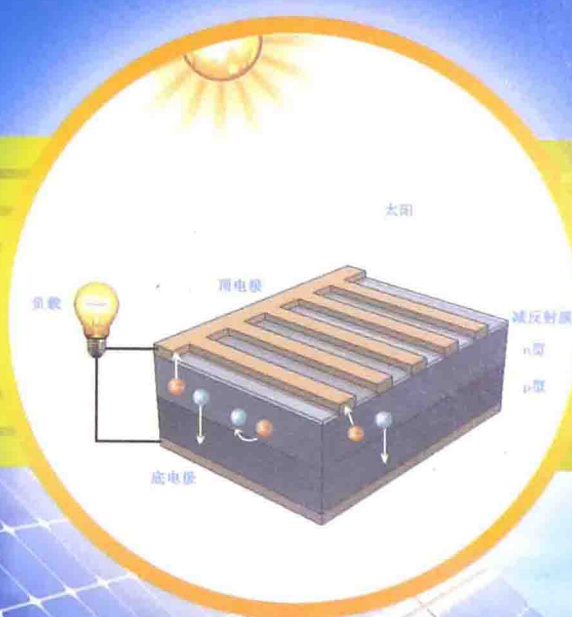


太阳能电池

PHYSICAL FUNDAMENTALS OF SOLAR CELLS

物理基础

白一鸣 陈诺夫 戴松元 姚建曦 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

太阳电池物理基础

Physical Fundamentals of Solar Cells

白一鸣 陈诺夫 戴松元 姚建曦 编



机械工业出版社

本书系华北电力大学可再生能源学院光伏科学与工程专业的专业教材。全书系统地介绍了太阳辐射的定量描述、细致平衡原理与太阳电池所涉及的基本概念、物理模型、伏安特性及一些典型太阳电池设计的基本理念。全书共7章,包括太阳能与太阳电池、细致平衡原理与太阳电池 $J-V$ 关系、载流子的统计分布与电流、非平衡载流子的产生与复合、pn结及其伏安特性、太阳电池的伏安特性和半导体结。全书内容深入浅出、概念清晰、图文并茂、物理图像鲜明,非常适合作为光伏专业、能源专业或其他相关专业的本科生和研究生的专业教材。本书也可以作为光伏领域科学工作者和工程技术人员的参考资料,帮助其在太阳电池领域打下坚实的物理基础,为研发各种类型的太阳电池提供指导和帮助。

图书在版编目(CIP)数据

太阳电池物理基础/白一鸣等编. —北京:机械工业出版社, 2014.8
ISBN 978-7-111-47369-5

I. ①太… II. ①白… III. ①太阳能电池-高等学校-教材
IV. ①TM914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第155243号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:张俊红

版式设计:赵颖喆 责任校对:樊钟英

封面设计:马精明 责任印制:刘 岚

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2014年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·9.5印张·184千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-47369-5

定价:29.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前言

能源是人类发展和社会进步的动力。随着经济和社会的发展,人类对能源的需求日益增加。而煤、石油、天然气等化石能源,经过数百年的巨大消耗,已经不可逆转地走向枯竭。与此同时,环境污染日益加剧、极端天气频繁出现,不断挑战着人类的忍耐极限,也促使人们越来越清楚地认识到绿色可再生能源对国家经济发展、社会稳定及国家安全的重要性。

1954年,美国贝尔实验室第一块单晶硅太阳能电池问世,揭开了现代太阳能电池研究和开发的序幕。经过60年的发展,一方面,传统晶体硅太阳能电池效率不断提高,成本逐渐下降;同时新概念太阳能电池不断涌现;另一方面,世界光伏产业蓬勃发展,迅速成为备受瞩目的朝阳产业。根据欧洲光伏产业协会(EPIA)统计,2013年全球光伏组件产量达到40GW,光伏市场新增装机容量为37GW,累计装机容量达到136GW,同比增长35%;同时,EPIA保守预测,全球光伏市场仍将继续保持持续增长的势头,2014年装机容量有望突破42GW。欧盟联合研究中心(JRC)也大胆预测,到2030年,光伏发电在全球总电力供应中的比例将达到10%以上,到21世纪末将达到60%以上。由这些数据可见,光伏发电在人类能源结构中的战略地位日益凸显,光伏技术与产业高速发展的时代已经到来。

中国,在这个新兴的产业中迅速崛起。从2008年开始,中国光伏组件产量跃居世界第一。2013年,光伏组件产量达到26GW,为世界总产量的65%;同时,中国也一改往日两头在外的尴尬境地,国内装机容量仅2013年就突破10GW,2014年有望突破14GW,且这种强劲的增长趋势在未来数年内仍将持续不变。在这样的背景下,尽管越来越多的有识之士抓住历史的契机,投身于光伏产业的基础研究和技术研发工作,但是光伏行业“人才荒”的问题已经日益凸显,而且随着光伏产业规模持续扩大,人力资源的缺口将成为制约我国光伏产业持续、快速发展的一个主要瓶颈。在这样的历史契机下,华北电力大学依托学校能源电力领域的两个国家级重点学科,在国内首批申请并建立了“大电力”背景下特色鲜明的光伏科学与工程专业,开始致力于培养具有较强实践能力、良好发展潜力的高级太阳能发电技术与管理人才、具有国际竞争力的创新型专业人才。

但是,迄今为止,国内尚无完善的光伏科学与工程人才教育和培养体系的经验可以借鉴。华北电力大学可再生能源学院学术委员会邀请光伏领域知名专家学者进行了十余次研讨,制定了以“厚基础、重实践、强能力”为目标的专业培养方案。培养方案中专业课程包括太阳能电池物理基础、太阳能电池材料与器件、太阳能电池材料测试分析、光伏电站设计、运行与控制等专业课程,该培养方案在同类专业建设中



起到了引领作用。

仅就光伏科学与工程这个新专业的教材体系而言，尽管目前市面上存在一些关于太阳能电池方面的图书，这些图书也为光伏科技工作者提供了很好的学习和参考素材，但是这些图书多涉及材料、器件和工艺层面，关于太阳能电池物理基础的系统理论知识的介绍较少。基于此，为了更加科学、全面地培养基础理论扎实的专业人才，也为了光伏科技工作者基础物理知识的获取，作者结合十余年光伏领域的研究和三年本科《太阳能电池物理基础》的实践教学工作编写了此书。此书系统全面地介绍了太阳辐射、太阳能电池基本原理、载流子的统计分布与电流、非平衡载流子的产生与复合、pn 结及其伏安特性、太阳能电池的伏安特性和半导体结等内容，在每一章的最后给出了一些习题，以帮助读者掌握该领域的主要理论基础。

本书的很多内容是基于编者在半导体材料与器件方面长期的教学和科研工作的实践体会和积累，书中的内容也参考了大量国内外相关领域的图书和文献，引用了参考文献中的部分内容和数据，在此特向书刊作者由衷地致以谢意。在本书的撰写过程中，我们也有幸得到了很多人的帮助和支持。首先感谢华北电力大学可再生能源学院太阳能中心各位老师的帮助和指导；此外，本书是在机械工业出版社的大力支持下出版的，作者对于出版社各位老师的辛勤付出表示衷心的感谢。

另外，为便于采用本书当教材的老师的教学工作，本书专门配备了电子课件，凡一次性购书 30 册以上的教师，我们均免费赠送一份电子课件，请通过电子信箱 buptzjh@163.com 与我们联系。

由于编写时间仓促、水平有限，书中难免会存在不妥和不足之处，殷切希望各位专家学者和广大读者批评指正，您的指正是本书日臻完善的动力！

编 者

2014 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 太阳能与太阳电池	1
★1.1 太阳辐射	1
1.1.1 几个重要名词	1
1.1.2 太阳表面辐照度的计算	3
1.1.3 地球大气层外太阳辐照度的计算	4
1.1.4 不同特征温度下黑体辐射的光子通量	5
1.1.5 影响地球表面太阳辐射的各种因素	6
★1.2 世界太阳能资源分布	7
★1.3 我国太阳能资源分布	8
★1.4 太阳能的利用方式	10
★1.5 太阳电池基本工作原理	10
★1.6 太阳电池发展历程	12
★1.7 太阳电池芯片、组件和系统	15
★1.8 小结	16
习题	17
参考文献	17
第 2 章 细致平衡原理与太阳电池 $J-V$ 关系	19
★2.1 细致平衡原理	19
2.1.1 几个重要概念	19
2.1.2 细致平衡原理的基本假设	20
2.1.3 细致平衡原理的证明	21
★2.2 太阳电池的光电流与暗电流	22
★2.3 太阳电池的 $J-V$ 关系	23
★2.4 小结	25
习题	25
参考文献	25
第 3 章 载流子的统计分布与电流	27



★3.1	半导体材料的分类	27
★3.2	半导体材料的晶格结构	28
3.2.1	金刚石型结构	29
3.2.2	闪锌矿型结构	29
3.2.3	纤锌矿型结构	30
3.2.4	岩盐结构	30
★3.3	半导体中电子的状态和能带	30
3.3.1	薛定谔方程与布洛赫波	31
3.3.2	直接带隙和间接带隙	32
★3.4	热平衡状态载流子的统计分布与电流	34
3.4.1	状态密度	34
3.4.2	费米-狄拉克分布	36
3.4.3	麦克斯韦-玻尔兹曼分布	37
3.4.4	导带中电子浓度与价带中空穴浓度	38
3.4.5	热平衡状态的电流	38
★3.5	半导体的载流子浓度	39
3.5.1	本征半导体的载流子浓度	39
3.5.2	n型半导体的载流子浓度	40
3.5.3	p型半导体费米能级	42
3.5.4	补偿半导体	43
3.5.5	简并半导体与非简并半导体	43
3.5.6	缺陷	44
3.5.7	半导体的电导率和迁移率	44
★3.6	准热平衡状态载流子的统计分布与电流	45
3.6.1	准热平衡状态的载流子浓度	45
3.6.2	准热平衡状态载流子的统计分布	46
3.6.3	准热平衡状态载流子的电流	47
★3.7	漂移电流与扩散电流	48
3.7.1	电子亲和势	48
3.7.2	功函数	49
3.7.3	扩散和漂移	50
★3.8	小结	50
	习题	51
	参考文献	52

★4.1 非平衡载流子产生与复合的分类	53
4.1.1 非平衡载流子产生的分类	53
4.1.2 非平衡载流子复合的分类	54
4.1.3 产生率与复合率	55
4.1.4 非平衡载流子的寿命	56
★4.2 非平衡载流子的产生	56
4.2.1 非平衡载流子产生的微观物理图像	56
4.2.2 非平衡载流子产生的宏观表现	58
★4.3 非平衡载流子的复合	61
4.3.1 辐射复合	61
4.3.2 俄歇复合	66
4.3.3 陷阱复合	67
4.3.4 表面复合和晶界复合	70
★4.4 载流子的输运方程	71
4.4.1 连续性方程	71
4.4.2 泊松方程	72
4.4.3 一维稳态半导体的连续性方程	72
★4.5 小结	74
习题	75
参考文献	76
 第5章 pn 结及其伏安特性	77
★5.1 pn 结的形成	77
5.1.1 pn 结形成的物理过程	77
5.1.2 pn 结接触电势差与势垒高度	79
5.1.3 空间电荷区电场、电势的分布及耗尽宽度的计算	79
5.1.4 空间电荷区实际载流子的分布	82
★5.2 pn 结电流电压特性	83
5.2.1 pn 结的单向导电性	83
5.2.2 理想 pn 结的电流电压特性	86
★5.3 pn 结的制备方法	89
5.3.1 扩散法	89
5.3.2 合金法	89
5.3.3 薄膜外延法	89
5.3.4 离子注入法	90
★5.4 小结	90



习题	91
参考文献	91
第 6 章 太阳电池的伏安特性	92
★6.1 太阳电池的工作原理	92
6.1.1 从载流子输运的角度分析光电流 J_{ph} 与暗电流 J_{dark}	93
6.1.2 光照条件下 pn 结能带的变化	94
★6.2 光生载流子的浓度和电流	94
6.2.1 电中性区的载流子浓度和电流	95
6.2.2 空间电荷区的载流子浓度和电流	96
6.2.3 净电流	97
★6.3 太阳电池的伏安特性	97
6.3.1 电中性区的电流表达式	97
6.3.2 空间电荷区的电流表达式	98
6.3.3 净电流表达式	99
6.3.4 暗电流表达式	99
6.3.5 短路电流与伏安特性方程	100
★6.4 太阳电池的伏安特性曲线	101
6.4.1 理想太阳电池的等效电路图与伏安特性曲线	101
6.4.2 描述太阳电池的几个重要参数	102
6.4.3 实际太阳电池的等效电路图与伏安特性曲线	103
★6.5 太阳电池的伏安特性测试与外量子效率测试	105
6.5.1 太阳电池伏安特性测试	105
6.5.2 太阳电池外量子效率测试	108
★6.6 小结	110
习题	110
参考文献	111
第 7 章 半导体结	113
★7.1 载流子分离的内部驱动力	113
★7.2 金属 - 半导体接触	113
7.2.1 欧姆接触	113
7.2.2 肖特基接触	116
★7.3 pin 结	118
★7.4 同质结与异质结	120

7.4.1 同质结	120
7.4.2 异质结	120
★7.5 体异质结	122
7.5.1 有机太阳电池	122
7.5.2 染料敏化太阳电池	124
★7.6 表面态与界面态	126
7.6.1 表面态	126
7.6.2 界面态	127
★7.7 小结	128
习题	128
参考文献	128
附录	130
★附录 A 常用物理常数表	130
★附录 B 常见太阳电池材料物理参数表	130
★附录 C 标准 AM1.5 太阳光谱辐照度	131
★附录 D 参考符号表	135

第1章 太阳能与太阳电池

在能源问题日益突出的今天，太阳能，作为一种取之不尽、用之不竭、清洁无污染的绿色能源，对其有效开发利用已成为实现能源可持续发展的重中之重。在太阳能的有效利用中，光伏发电技术是近年来发展最快，最具活力的研究领域之一。本章在详细介绍太阳辐照特点与光谱特性的基础上，概括性介绍了太阳电池发展历程与太阳电池芯片、组件和系统，使读者对太阳辐射、太阳电池和光伏发电形成初步的认识。

☆☆☆1.1 太阳辐射☆☆☆

太阳是一个炽热的气体球。它的直径为 $1.39 \times 10^6 \text{ km}$ ，与地球的平均距离为 $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ 。太阳是一个核聚变反应堆，产生的能量从太阳内部传到太阳表面，然后向空间辐射出去。太阳辐射能的 90% 是在 $0 \sim 0.23R$ (R 为太阳半径) 的区域内产生。该部分占太阳质量的 40%。 $0.7R \sim 1.0R$ 之间的区域为对流层，该区域内温度降到约 6000K。太阳表面由许多不规则的对流团组成，它们的分布区域为 1000 ~ 3000km。这些对流区的外层为光球。光球几乎是不透明的，因为构成光球的气体被强烈地电离，并且能够吸收和发射连续的辐射光谱。光球是太阳的主要辐射源。在光球的外面存在一层不同透明程度的太阳雾。这层厚度为几百千米较冷的气体层为反变层。它的外面为色球，厚度约为 10 000km。最外面一层为日冕，其密度很小而温度很高，达到 10^6 K 。从太阳的结构来看，不能将太阳当做固定温度的黑体辐射体。确切地说，太阳的辐射是它的各层发射和吸收各种波长的辐射综合作用的结果。但是，在许多情况下，把太阳当做约 6000K 温度下的黑体辐射源是恰当的。

所谓黑体，是指能够完全吸收辐射到它上面的各种频率电磁波而无反射的物体。理想黑体发出的辐射，仅与自身的温度 T 有关，与黑体的其他特性或外来入射的电磁辐射无关。我们称黑体的自身温度为黑体的特征温度。

为了更为准确地描述太阳辐射，需要定义关于电磁波辐射的物理量——辐照度、光谱辐照度、光子角通量和光子通量。

★1.1.1 几个重要名词

1. 辐照度

辐照度 P (单位为 W/cm^2)：单位面积上接收电磁波辐射的功率。

2. 光谱辐照度

光谱辐照度 I (单位为 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$)：单位面积、单位光谱能量上接收的

电磁波辐射功率，式 (1.1) 中 E 为光子能量。显然，辐照度 P 即为光谱辐照度在整个光谱范围 E 内的积分^[1]。

$$I = \frac{dP}{dE} \tag{1.1}$$

3. 光子角通量

光子角通量 β (单位为 $\text{cm}^{-2} \text{nm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)：单位面积、单位光谱能量、单位时间、单位立体角范围通过的光子数，是一个矢量。立体角 (Ω , sr) 用经度 θ 和纬度 φ 描述 $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ 。

$$\beta = \frac{d}{Ed\Omega} \left(\frac{dP}{dE} \right) \vec{\beta}_0 = \frac{d^2P}{EdEd\Omega} \beta_0 \tag{1.2}$$

4. 光子通量

对于太阳电池而言，可以吸收的辐射是光子角通量 β 的垂直分量 $\beta \cos\theta$ ，因此，光子通量 b 是 $\beta \cos\theta$ 在可以接收辐射的立体角范围 Ω 内的积分。光子通量的定义 b (单位为 $\text{cm}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{s}^{-1}$)：单位面积、单位光谱能量、单位时间通过的光子数^[1]。

$$b = \int_{\Omega} \beta \cos\theta d\Omega = \frac{dP}{EdE} \tag{1.3}$$

对比光子角通量与光子通量的定义可知，前者描述了各个方向上接收单色光子的强度，后者则描述了在垂直方向上接收的单色光子数，如图 1.1 所示。表 1.1 所示为光谱辐照度 I 、光子角通量 β 和光子通量 b 的三种常用单位^[2]。

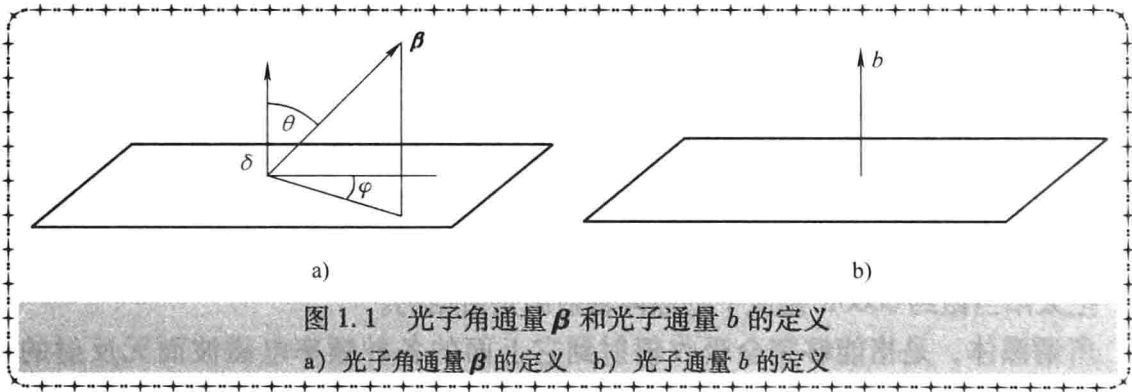


表 1.1 光谱的不同单位

光谱单位	eV	J	nm
光谱辐照度 I	$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$
光子角通量 β	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
光子通量 b	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

5. 大气质量

太阳辐射在地球大气中的衰减，可以用大气质量 AM 来描述。太阳在头顶正上方时，光线通过大气层的路程最短，光学大气质量为 1.0，这时的辐射称为 AM1.0 的辐射。当太阳和头顶正上方成一个角度 θ 时，大气光学质量为

$$\text{AM} = 1/\cos\theta \tag{1.4}$$

即光线通过大气层的实际路程与此最短路程之比称为大气质量^[3,4]。图 1.2 所示为大气质量与角度 θ 的示意图。例如, 当 $\theta = 60^\circ$ 时, $AM = 1/\cos 60^\circ = 2$ 。

在其他大气条件不变的情况下, 随着大气质量的增加, 太阳光到达地球的能量衰减越大。图 1.3 对比绘出了大气质量 AM0、AM1.5 和 AM2.0 的太阳光谱图。

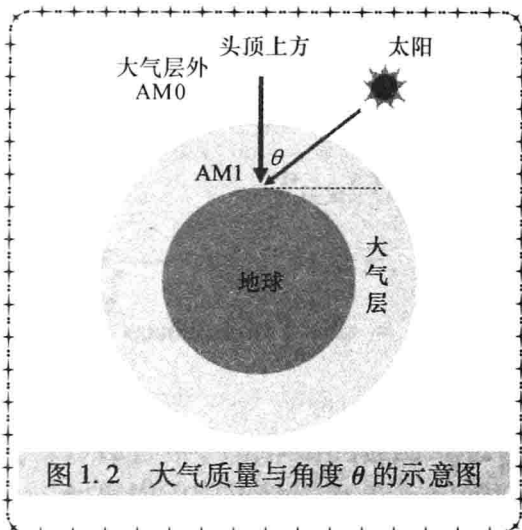


图 1.2 大气质量与角度 θ 的示意图

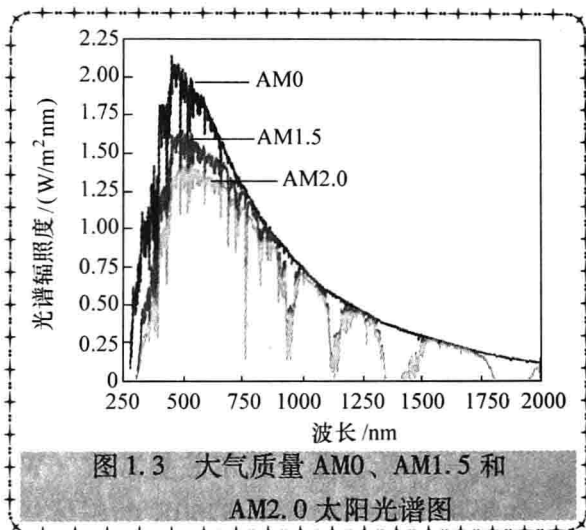


图 1.3 大气质量 AM0、AM1.5 和 AM2.0 太阳光谱图

在无法知道 θ 值的情况下, 如何估算大气质量 AM? 估算大气质量的最简易方法是测量高度为 h 的竖直物体投射的阴影长度 s 。于是有

$$AM = \sqrt{1 + (s/h)^2} \quad (1.5)$$

式中 h ——物体的高度;

s ——竖直物体投影的阴影长度, 如图 1.4 所示。

★1.1.2 太阳表面辐照度的计算

理想太阳光谱可以看作温度 $T_s = 5760\text{K}$ 的黑体所辐射的电磁波谱, 根据描述黑体辐射的普朗克辐射定律得到在太阳表面外任一点, 太阳光子角通量 $\beta_{\text{sun}}(E, T_s)$ 为

$$\beta_{\text{sun}}(E, T_s) = \frac{2}{h^3 c^2} \frac{E^2}{e^{E/k_B T_s} - 1} \quad (1.6)$$

式中 k_B ——玻尔兹曼常数;

h ——普朗克常数;

c ——光速。

在太阳表面, 接收的角度相当于半个空间, 立体角范围 Ω 为纬度 $\theta \in (0, \frac{\pi}{2})$, 经度 $\varphi \in (0, 2\pi)$, 光谱能量范围 $E \in (0, \infty)$ 。所以, 太阳表面任意一点的

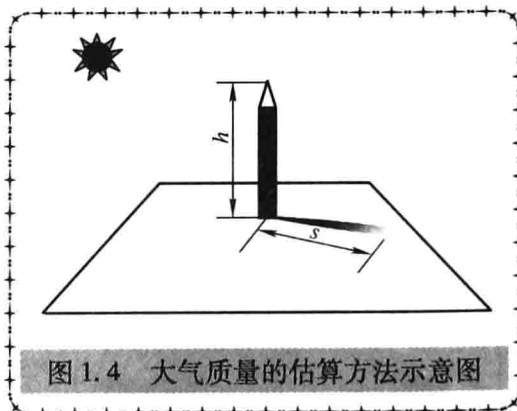


图 1.4 大气质量的估算方法示意图

辐照度 $P_{\text{sun_sf}}(T_s)$ 为

$$\begin{aligned} P_{\text{sun_sf}}(T_s) &= \iint_{E, \Omega} \beta_{\text{sun}}(E, T_s) E dE \cos\theta d\Omega \\ &= \int_0^\infty \frac{2}{h^3 c^2} \frac{E^2}{\exp(E/k_B T_s) - 1} dE \int_0^{\pi/2} \sin\theta \cos\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \quad (1.7) \end{aligned}$$

令 $u = \frac{E}{k_B T_s}$, 则 $P_{\text{sun_sf}} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} (k_B T_s)^4 \int_0^\infty \frac{u^3}{e^u - 1} du$, 进而求得

$$P_{\text{sun_sf}} = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15 h^3 c^2} T_s^4 = \sigma_s T_s^4 \quad (1.8)$$

其中 $\sigma_s = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15 h^3 c^2} = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$

式中 积分 $\int_0^\infty \frac{u^3}{e^u - 1} du = \frac{\pi^4}{15}$ 需用复变函数求解;

σ_s ——斯忒藩—玻尔兹曼常数 ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$)^[2]。

如果把太阳辐射作为 5760K 的黑体辐射, 由式 (1.7) 得到太阳表面任一点辐照度为

$$P_{\text{sun_sf}}(5760\text{K}) = \sigma_s T_s^4 = 63.2 \text{ MW/m}^2$$

★1.1.3 地球大气层外太阳辐照度的计算

太阳本身的特征和它与地球之间的空间关系, 使得地球大气层外的太阳辐射强度几乎是一个定值。在平均日地距离情况下, 在地球大气层外, 垂直于太阳辐射的表面上, 单位面积单位时间内所接收到的太阳辐射能量称为太阳常数。下面介绍地球大气层外任一点太阳辐照度的计算。图 1.5 所示为日地距离示意图。

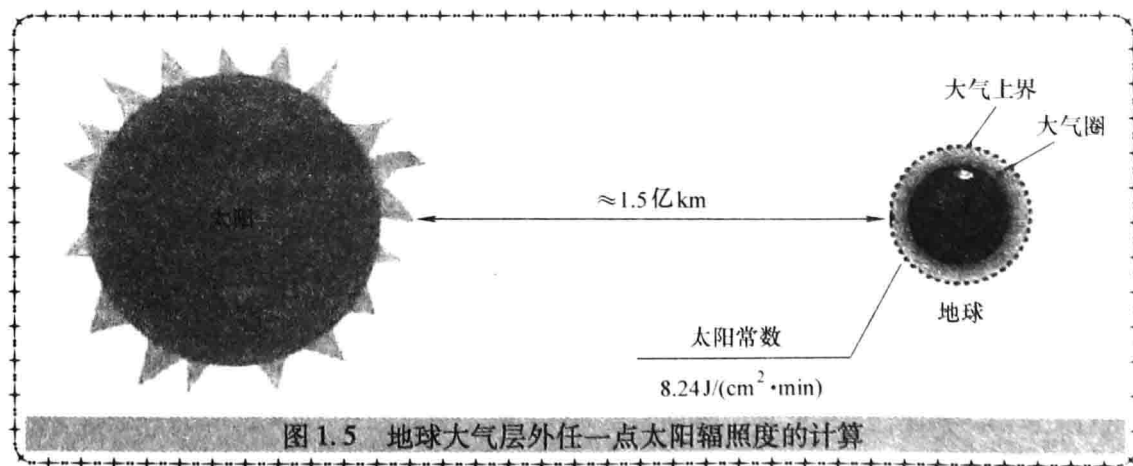


图 1.5 地球大气层外任一点太阳辐照度的计算

从地面观察太阳, 太阳直径为 $d_{\text{sun}} = 1.39 \times 10^6 \text{ km}$, 地球—太阳距离为 $l_{\text{earth-sun}} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$, 太阳半角为

$$\theta_s = \arcsin\left(\frac{d_{\text{sun}}/2}{l_{\text{earth-sun}}}\right) \approx \arctan\left(\frac{d_{\text{sun}}/2}{l_{\text{earth-sun}}}\right) = \arctan\left(\frac{1.39 \times 10^6/2}{1.5 \times 10^8}\right) = 0.2655^\circ \quad (1.9)$$

地球大气层外任一点太阳光子通量为

$$b_{\text{ex-at}}(E, T_s) = \int_{\Omega} \beta_{\text{sun}}(E, T_s) \cos\theta d\Omega = \frac{2F_s}{h^3 c^2} \frac{E^2}{\exp(E/k_B T_s) - 1} \quad (1.10)$$

地球大气层外任一点太阳辐照度为

$$P_{\text{ex-at}}(T_s) = \int_E \int b_{\text{ex-at}}(E, T_s) E dE = \frac{F_s}{\pi} \sigma_s T_s^4 \quad (1.11)$$

式中 F_s ——太阳几何因子, 描述太阳半角对太阳辐照度 $P_{\text{ex-at}}$ 的限制。

$$F_s = \int_0^{\theta_s} \cos\theta \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi = \left(-\frac{1}{4} \cos 2\theta_s + \frac{1}{4}\right) \times 2\pi = \pi \sin^2 \theta_s = 2.15 \times 10^{-5} \pi \quad (1.12)$$

式 (1.12) 中, 立体角的范围 Ω 为纬度 $\theta \in (0, \theta_s)$, 经度 $\varphi \in (0, 2\pi)^{[2]}$ 。

如果把太阳辐射作为 $T_s = 5760\text{K}$ 的黑体辐射, 则地球大气层外任意一点接收的太阳辐照度为

$$P_{\text{ex-at}}(5760\text{K}) = \frac{2.15 \times 10^{-5} \pi}{\pi} \times 63.2 \times 10^6 = 1359\text{W/m}^2 \quad (1.13)$$

近年来, 随着高空飞机、气球和空间飞行器等先进探空工具的使用, 人们对地球大气层外的太阳辐射强度进行了大量的测量。根据这些测量值整理得到的太阳常数值为 1353W/m^2 ^[5,6]。此时, 对应的太阳光谱称为 AMO 太阳光谱。

★1.1.4 不同特征温度下黑体辐射的光子通量

不同特征温度的黑体, 其光子角通量 $\beta_{\text{blackbody}}$ 可以描述太阳的辐射, 其表达式为式 (1.6), 那么空间任意一点接收的光子通量可用式 (1.9) 描述。其中, 立体角 Ω 的范围以太阳和地球间的角度为例, 即纬度 $\theta \in (0, 0.2655^\circ)$, 经度 $\varphi \in (0, 2\pi)^{[3]}$ 。

根据式 (1.6) 和式 (1.9) 定义能量 E 为自变量, $b_{\text{ex-at}}$ 为因变量。在 MATLAB 软件中编写 blackbody_spectrum 程序, 可以绘出不同特征温度下太阳光子通量光谱, 如图 1.6 所示。程序内容如下:

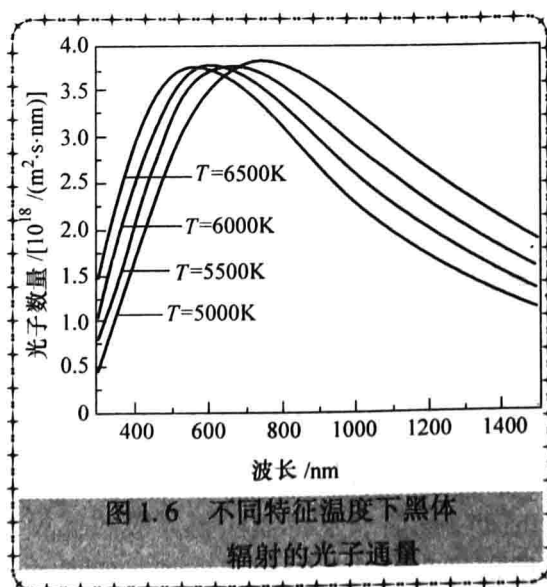


图 1.6 不同特征温度下黑体辐射的光子通量



```

function [photon,energy,wavelength,aa] = blakbody_spectrum(wavelength_min,wavelength_max,temp)
% [photon, energy, wavelength, aa] = blakbody_spectrum (300, 2000, 6000);
wavelength = wavelength_min:(wavelength_max - wavelength_min)/(2000 - 300):wavelength_max;
siz = size (wavelength);
energ = zeros (siz);
photon = zeros (siz);
m = quad8 (@ blackbody, 300, 2000, [], [], temp);
aa = 1000/m;
for i = 1: siz (2)
energ (i) = aa * blackbody (wavelength (i), temp);
end
ss = 1.24e3 * ones (siz) ./wavelength;
photon = energ. / (ss * 1.6022e - 19);
% output results.
subplot (2, 1, 1);
plot (wavelength, energ);
xlabel ('wavelength ( nm ) ');
ylabel ('energy distribution ( W m^-2 nm^-1 ) ');
subplot (2, 1, 2);
plot (wavelength, photon/1e17);
xlabel ('wavelength ( nm ) ');
ylabel ('photon distribution ( * 1e17 m^-2 s^-1 nm^-1 ) ');
function f = blackbody (lamda, temp)
% lamda is wavelength, nm.
c = 2.998e8;
h = 6.625e - 34;
k = 1.38e - 23;
l = lamda/1e9;
hc = h * c;
f = 8 * pi * hc. / (l.^5. * (exp (hc. / (l. * k * temp)) - 1));

```

★1.1.5 影响地球表面太阳辐射的各种因素

太阳辐射透过大气层到地面的情况有两种。一种是由太阳直射到地面，中途不改变方向，称为直接辐射；另一种是经过大气吸收、散射或经地面反射而改变方向的辐射，称为间接辐射。间接辐射包括由太阳辐射经过大气吸收、散射后间接到达的天空辐射以及由地面物体吸收或反射辐射的地面辐射。在太阳能的利用方面，直接辐射和间接辐射都具有相当重要的地位。它们之和称为太阳总辐射量。

影响地球表面太阳辐射的主要因素可以概括为四个方面。

1) 天文因素：包括太阳与地球间距离的变化；太阳赤纬的变化；地球自转时，以每小时 15° 的角速度推移，造成早、中、晚接收太阳光强弱的不同；昼夜更替接收阳光的断续。

2) 地理因素：观测和接收地点所在的纬度、经度和海拔、地势地貌的不同。

3) 几何因素：太阳高度角、赤纬的变化；辐射接收面的倾斜度和方位的不同。

4) 物理因素：大气的吸收、反射和散射引起的衰减，以及接收面的物理特性，粗糙或光滑的不同；化学性质、金属材料与非金属材料的不同等。

这里主要讨论大气吸收对太阳辐射的影响。大气的组成可以分为三个部分：一是固定气体，包括氮、氧、氩、氦、氢、氖、氪等气体；二是变动气体，包括水蒸气、二氧化碳、臭氧等；三是固体尘埃，如烟、尘、微生物、花粉一类的有机物、放射性微粒等。阳光穿过地球大气层时，至少衰减了 30%。造成衰减的原因有：

1) 瑞利散射或大气中的分子散射。这种散射对所有波长的太阳光都有衰减作用，但对短波长的光衰减最大。

2) 大气吸收，特别是其组成气体——臭氧、水蒸气和二氧化碳的吸收。

3) 悬浮微粒和灰尘引起的散射。

到达地球表面的太阳光的典型光谱分布如图 1.7 中下面的一条曲线所示，它表明了吸收带与分子吸收有关，氧气吸收波长小于 $0.2\mu\text{m}$ 的紫外光，在 $0.155\mu\text{m}$ 处吸收最强。臭氧主要存在于 $10\sim 40\text{km}$ 的高层大气中，在 $20\sim 25\text{km}$ 处最多。臭氧在整个光谱范围内都有吸收，主要是 $0.2\sim 0.32\mu\text{m}$ 和 $0.6\mu\text{m}$ 处的两个吸收带，臭氧的吸收要占总辐射照度的 2.1% 左右。在可见光和红外区域，水蒸气的吸收约占总辐射照度的 20%。

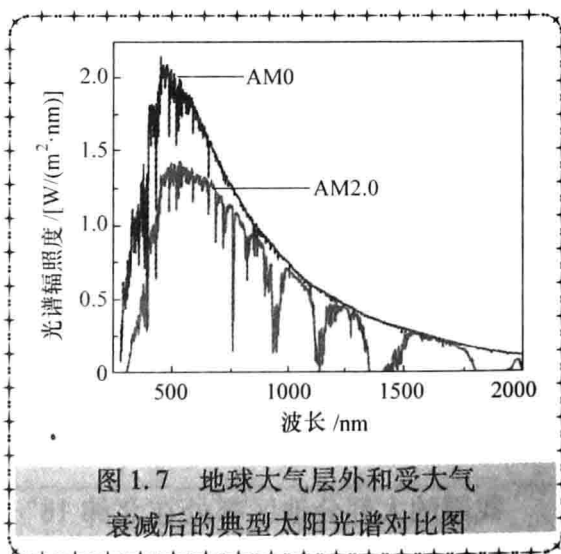


图 1.7 地球大气层外和受大气衰减后的典型太阳光谱对比图

太阳辐射通过大气层时的衰减，与人类自身的活动也密切相关。矿物燃料的大量使用，使大气中的二氧化碳含量正在不断增加。此外，云层对太阳辐射的反射和吸收的影响也很大。

☆☆☆1.2 世界太阳能资源分布☆☆☆

地球上太阳能资源的分布与各地的纬度、海拔、地理状况、气候条件等密切相关。实际上的地球太阳平均辐照度为 $170\text{W}/\text{m}^2$ ，即使在很多沙漠地区，也仅为数