

“十二五”普通高等教育本科规划教材

硅太阳能电池 光伏材料

种法力 滕道祥 编著

GUI TAIYANGNENG DIANCHI
GUANGFU CAILIAO



化学工业出版社

“十二五”普通高等教育本科规划教材

硅太阳能电池 光伏材料

种法力 滕道祥 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

随着经济发展和人口的增多,传统能源供应频频告急,传统能源的使用对环境危害也日益加剧,太阳能光伏发电作为可再生清洁能源正受到世界各国的关注并广泛应用。本书全面介绍了太阳清洁能源的特征和发展历程,在半导体物理知识基础上重点阐述了太阳能光伏发电原理和光伏发电系统,以及从多晶硅原料到硅光伏阵列等工艺技术。

本书内容新颖、实用性强,可作为高等院校太阳能光伏专业(方向)本科生教材,也可作为高职高专、技校学生教材和从事硅光伏能源产业的人员培训教材,还可供从事太阳能光伏应用技术相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

硅太阳能电池光伏材料/种法力,滕道祥编著. —北京:化学工业出版社,2015.3

ISBN 978-7-122-22857-4

I. ①硅… II. ①种…②滕… III. ①硅太阳能电池-光电池 IV. ①TM914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第015076号

责任编辑:杨菁
责任校对:王素芹

文字编辑:徐雪华
装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张14 字数347千字 2015年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前言

煤、石油、天然气资源是不可再生资源，世界储量越来越少，消耗量却越来越大，传统能源供给捉襟见肘，在生产和消费过程中也会有大量污染物排放，破坏生态和环境。太阳能、风能、水能、潮汐能等被认为是无污染的清洁能源，在一些国家很大程度上缓解了能源压力，其中太阳能取之不尽，用之不竭，成为一种重要的可再生能源。太阳能光伏发电得到世界普遍的应用和推广，该发电系统建设周期短、使用寿命长、维护简单、安全可靠、对环境污染少、规模大小可自由控制，而且光伏建筑一体化集建筑材料的功能与发电本能形成完美的统一体，提升了建筑物的美感，节约安装空间。

我国有丰富的太阳能资源，光伏发电具有巨大的潜力，而且我国已经形成了完整的光伏产业链，在世界光伏产业上占据非常重要的一席之地。从太阳能电池产量来看，晶体硅太阳能电池仍然占据主导地位，市场占有率一直在90%以上，晶体硅太阳能电池具有较为成熟的制作工艺和显著的优点，转化效率不断升高，成本大幅度降低，所以今后在较长的一段时间内，这种主导地位将不会改变，晶体硅太阳能电池仍然是光伏主流产品。

本书由编者多年的授课讲义和生产实践总结整理而成，内容涵盖了多晶硅原料的制备，电池片制作工艺技术，光伏组件的封装，光伏发电系统等内容。本书在编写过程中重视理论与实践的结合，在理论上要求浅显易懂，知识量达到够用、实用即可，在实践上注重实践技能的可操作性，力求读者能够顺利进入生产车间进行实践操作。

本书由种法力、滕道祥编写。滕道祥编写第1章和第2章；种法力编写第3章~第7章。另外，在此书编写过程中，对提出宝贵意见的老师和朋友，在此表示衷心感谢。

本书在编写中参考了大量著作和文献资料，无法全部列出，在此谨向作者致以谢意。

由于编者知识面和水平所限，以及掌握的文献资料有限，并考虑到科学技术的快速发展，知识在不断的更新，书中疏漏和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2014年12月

目录

第 1 章 概论 1

1.1 能源和经济	1
1.2 3E 问题	3
1.3 温室效应	4
1.3.1 地球温度估算	4
1.3.2 温室效应本质	4
1.4 太阳	5
1.5 太阳辐射	6
1.6 大气质量	9
1.7 太阳能的利用	10
1.8 太阳能的优缺点	11
1.9 太阳能电池的发展史	12
1.10 中国太阳能电池的历史及产业现状与未来	13

第 2 章 半导体物理基础 16

2.1 半导体	16
2.1.1 半导体分类和特征	16
2.1.2 电阻率、电导率	17
2.1.3 电子、空穴	17
2.2 载流子	18
2.2.1 载流子迁移率	18
2.2.2 载流子浓度	19
2.2.3 载流子产生、复合	19
2.3 纯度	21
2.4 本征半导体	21
2.5 杂质半导体	22
2.5.1 半导体中杂质填充	22
2.5.2 深/浅能级杂质	23

2.5.3	N型半导体	23
2.5.4	P型半导体	25
2.6	P-N结	26
2.6.1	P-N结形成	26
2.6.2	P-N结电势差和电场	27
2.6.3	P-N结单向导电性	30
2.6.4	P-N结击穿	30
2.7	晶体	32
2.7.1	晶体特征	32
2.7.2	晶体结构	33
2.7.3	晶向与晶面	34
2.7.4	晶向与晶面的关系	37
2.7.5	结晶过程	39
2.7.6	晶核形成	41
2.8	能级、能带	42
2.9	费米能级	43
2.10	半导体导电能力	44
2.11	晶体缺陷	46

第3章 太阳能电池基本原理 51

3.1	太阳能电池	51
3.1.1	光电效应与太阳能电池	51
3.1.2	光伏效应实质	52
3.1.3	丹伯效应	52
3.2	太阳能电池发电原理	53
3.2.1	太阳能电池基本结构	53
3.2.2	太阳能电池三区域	53
3.3	太阳能电池表征参数	54
3.4	太阳能电池电路模型	56
3.5	半导体光吸收	57
3.6	太阳能电池转换效率影响因素	60
3.6.1	光损失	60
3.6.2	载流子复合损失	61
3.6.3	串并联电阻损失	61
3.7	太阳能电池转化效率 η 极限	62
3.7.1	短路电流 I_{sc} 极限	62
3.7.2	开路电压 V_{oc} 极限	62
3.7.3	填充因子 FF 极限	63
3.7.4	转化效率 η 极限	63
3.8	温度对太阳能电池的影响	64

3.9	太阳能电池组件的“热斑效应”	65
3.10	量子效率	68
3.11	太阳能电池的光谱响应	69

第4章 多晶硅制造工艺 71

4.1	太阳能电池材料选择	71
4.2	硅材料特征	71
4.3	硅的用途	73
4.4	西门子法制造多晶硅	73
4.4.1	冶金级硅(MG-Si)制造	74
4.4.2	三氯硅烷制造	80
4.4.3	SiHCl ₃ 氢气还原制造SG-Si	84
4.5	改良西门子法制造多晶硅	87
4.5.1	改良西门子法优缺点	87
4.5.2	尾气回收原理	88
4.5.3	SiCl ₄ 氯化	88
4.5.4	SiHCl ₃ 还原反应设备的改进	89
4.6	硅烷热分解法制造多晶硅	90
4.6.1	硅烷物理、化学性质	90
4.6.2	硅烷热分解法优缺点	91
4.6.3	氯硅烷歧化法	92
4.6.4	硅合金分解法	93
4.6.5	四氟化硅还原法	94
4.6.6	硅烷热分解	94
4.7	多晶硅其他制造方法	95

第5章 晶体硅片制造工艺 97

5.1	直拉法制造单晶硅棒	97
5.1.1	直拉单晶炉结构	97
5.1.2	热场	100
5.1.3	熔体对流对固液界面形状的影响	103
5.1.4	重要的原辅料	104
5.1.5	直拉单晶硅制造流程	107
5.1.6	单晶硅良率控制	113
5.1.7	单晶硅品质控制	113
5.1.8	单晶硅杂质分布	114
5.2	磁控直拉法	115
5.2.1	磁控直拉法原理	115
5.2.2	磁控直拉法磁场问题	116
5.3	悬浮区熔法制造单晶硅棒	117

5.3.1	悬浮区熔原理及设备	117
5.3.2	悬浮区熔单晶生长	117
5.3.3	熔硅稳定问题	118
5.3.4	中子嬗变掺杂	119
5.3.5	直拉法与悬浮区熔法比较	119
5.4	多晶硅锭制造工艺	120
5.4.1	定向凝固传热分析	121
5.4.2	布里曼法	121
5.4.3	浇铸法	122
5.4.4	热交换法	122
5.4.5	电磁铸造法	123
5.4.6	多晶硅品质影响因素	123
5.5	硅带制造工艺	124
5.5.1	定边喂膜法	125
5.5.2	横向拉膜法	125
5.5.3	硅带其他制造方法	126
5.6	硅片切割工艺	127
5.6.1	修边/切方	127
5.6.2	切片	127
5.6.3	硅片表面质量检测	130

第 6 章 晶体硅太阳能电池片制造工艺 132

6.1	晶体硅太阳能电池	132
6.2	基板材料	133
6.3	表面制绒	134
6.3.1	硅片清洗	134
6.3.2	制绒意义和原理	134
6.3.3	单晶硅制绒	135
6.3.4	单晶硅制绒设备和流程	139
6.3.5	多晶硅制绒	140
6.3.6	多晶硅制绒设备和流程	141
6.3.7	绒面检测	144
6.4	扩散制 P-N 结	145
6.4.1	扩散原理	145
6.4.2	扩散方程	147
6.4.3	扩散分类	147
6.4.4	扩散系数	150
6.4.5	太阳能电池磷扩散制结原理	151
6.4.6	磷扩散工艺	152
6.4.7	硅片检验	155
6.4.8	等离子体刻蚀	157

6.4.9	去除磷硅玻璃	158
6.5	减反射膜 $\alpha\text{-SiN}_x\text{:H}$ 制备	159
6.5.1	减反射膜原理	159
6.5.2	减反射膜材料的选择	160
6.5.3	$\alpha\text{-SiN}_x\text{:H}$ 减反射膜性质	161
6.5.4	$\alpha\text{-SiN}_x\text{:H}$ 制备方法——PECVD	163
6.5.5	$\alpha\text{-SiN}_x\text{:H}$ 检验	167
6.6	SiN_x 表面钝化作用	167
6.6.1	钝化原理	167
6.6.2	氢钝化作用	169
6.6.3	SiN_x 厚度与少子寿命关系	169
6.7	丝网印刷及烧结工艺	170
6.7.1	丝网印刷原理	170
6.7.2	印刷设备及参数	170
6.7.3	丝网印刷步骤	174
6.7.4	丝网印刷检验	175
6.7.5	烧结	176
6.7.6	烧结检验	177

第7章 硅太阳能光伏发电系统 178

7.1	光伏发电系统组成要素	178
7.2	太阳能电池组件	181
7.2.1	封装材料	182
7.2.2	组件制造过程	184
7.3	光伏阵列	189
7.3.1	光伏阵列输出特性	189
7.3.2	光伏阵列尺寸	189
7.3.3	最大功率点跟踪控制	190
7.4	并网系统	192
7.4.1	并网发电分类	193
7.4.2	并网发电优缺点	194
7.4.3	并网系统的孤岛问题	194
7.4.4	太阳能光伏建筑一体化	195
7.5	独立系统	196
7.6	混合系统	197
7.7	太阳能光伏发电系统设计	198
7.7.1	独立系统容量设计	199
7.7.2	混合系统设计	202
7.7.3	并网系统设计	203
7.7.4	光伏组件倾角的确定	203
7.7.5	太阳能电池方阵间距的计算	205

附录 1 硅的部分特征@300K	206
附录 2 常用物理常数	206
附录 3 主要物理量	206
附录 4 名词术语中英文对照	207
参考文献	211

第1章

概 论

能源技术的革新带动了人类社会的进步，推动了社会的发展，然而随着世界人口基数不断增大，世界经济不断发展，能源的消耗呈现快速的增加趋势。传统能源面临消耗殆尽的境地，并由此带来的环境污染正一步步的危害着人们的健康，制约着经济进一步增长。因此，保护我们的家园——地球，发展可持续发展的清洁替代能源迫在眉睫。

本章从 3E 问题入手，探讨发展太阳能电池能源的必要性，太阳能的特征、优缺点，太阳能电池产业发展历程。

1.1 能源和经济

我国《能源百科全书》写着：“能源是可以直接或经转化提供人类所需的光、热、动力的任一种形式能量的载能体资源”。因此，能源是一种形式多且可互相转化的能量源泉，是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础，在国民经济中具有特别重要的战略地位。能源按照是否可以循环再利用的特点分为可再生能源和不可再生能源。大家熟知的煤炭、石油、天然气很难进行重复循环利用，是不可再生能源，也被称为常规能源。过去人们对常规能源的认识是“取之不尽、用之不竭”，但是在两次石油危机发生之后，对常规能源的观点发生了变化。

图 1-1 为世界能源消耗示意图。从图中可以看出，随着全球经济的发展，人类文明程度的提高，煤炭、石油、天然气及其他能源的消耗总量逐年增大，而且增大幅度也是越来越大。据专家估算三大传统能源可使用量及使用年限（从 2000 年起）分别如下：石油 1 万亿桶（40~50 年）、天然气 120 万亿立方米（50~60 年）、煤炭 1 万亿吨（约 200 年）。考虑到人口的增长（0.5~1 亿/年）和能源年消耗量的增加（1.6%），现在的煤炭、石油和天然气可使用时间将会大大缩短。

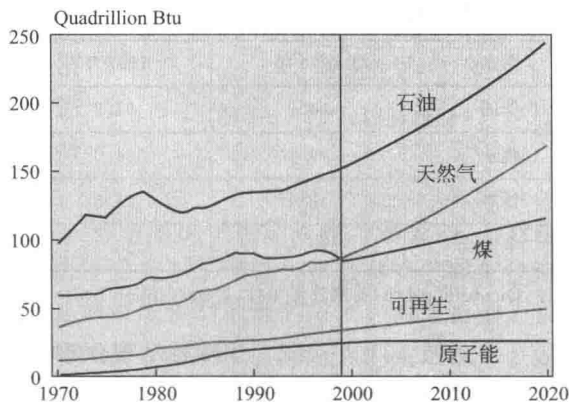


图 1-1 世界能源消耗示意图（1970~2020 年）

我国煤炭储量占世界储量的 10%、原油占 2.4%、天然气仅占 1.2%。但是由于人口众多，占世界人口的 20%，因此人均能源资源相对匮乏，不到世界水平的一半，石油仅为十分之一。随着我国经济的快速发展和人民生活水平的不断提高，我国年人均能源消耗量将逐年增加，已成为世界上第三大能源生产国和第二大能源消费国（如表 1-1），常规能源资源可使用年限要低于世界平均水平。人均常规能源资源相对不足，是中国经济发展、社会可持续发展的一个限制因素，尤其是石油和天然气。从 1993 年开始，我国成为能源净进口国。据预测，中国未来能源供需的缺口将越来越大，石油进口依存度（净进口量与消费量之比）由 1995 年的 6.6% 上升为 2000 年的 20%，2010 年上升到 54.8%，2013 年对外依存度已经增长接近 60%；2007 年天然气进口依存度仅为 2%，之后几年快速飙升，2009 年为 5%，2010 年为 11.8%，2011 年为 24.3%，2013 年对外依存度也突破 30%。经济越发达、国民收入越高的国家，对能源的消耗越大，比如美国、欧洲等国对能源的消耗远高于世界平均消耗值，比中国也高出 2 倍左右。但是，从对能源消耗的增幅比较发现，发达国家对能源消耗的增长幅度比发展中国家或者欠发达国家要小很多，比如美国从 1990 年到 1997 年能源消耗增幅为 12.1%，西欧为 6.8%，而中国对能源的消耗增幅则高达 35.9%。

那么，为什么越是经济发达的国家对能源消耗量越大？首先，经济发达国家国民收入较高，对物质的需求也就越多，不再满足于吃饱、穿暖的丰衣足食的生活状态，而是对生活有更高的追求，高品质的生活追求必然会消耗更多的能源。统计数据显示，发达国家人均能源消费是发展中国家或欠发达国家人均能源消费的数倍，甚至数十倍，如表 1-2 所示。其次，人口增多是能源消费增大的重要原因。人是能源消费的主体，能源消费的总量与人口数量有密切关系，虽然不同国家人均能源消费不同，但是人口多，消费量必然增加对能源的消耗。比较表 1-1 和表 1-2 可以看出，虽然中国 20 世纪 90 年代人均能源消费水平较低，而日本人均能源消费较高，但是由于中国人口基数较大，所以中国的总能源消耗量反而比日本要高许多。

表 1-1 主要能源消耗国家比较

单位：Quadrillion Btu

国家	1990 年	1997 年	增幅/%	与中国比较	预计 2020 年
美国	84.0	94.2	12.1	2.57	120.9
西欧	59.9	64.0	6.8	1.74	78.4
日本	18.1	21.3	17.7	0.48	25.4
中国	27.0	36.7	35.9		97.3

注：Quadrillion Btu，英制热量单位，1 Quadrillion Btu=10¹⁵ Btu=3600 万吨标准煤。

表 1-2 部分国家人均能源消费比较

单位：kg oil equ./person

年份	中国	美国	日本	法国	英国	韩国	加拿大	德国
1980 年	421	7908	2972	3539	3572	1087	7854	4587
1994 年	664	7819	3856	4042	3772	2982	7854	4128
2004 年	1240	79125	41758					

注：1 kg oil equ. = 10000 kcal = 41866 kJ = 4500 kW · h。

2. 资料来源：世界银行，1996 年世界发展报告，1997 年 6 月。

1.2 3E 问题

3E是指能源(Energy)、经济(Economy)和环境(Environment)。随着经济的发展,必然会消耗更多的能源,然而能源结构的变化会对地球环境产生影响。本节首先讨论3E矛盾,进而给出应对3E矛盾的解决途径。

世界人口在不断增长,而且增长速度在不断加快。1800年世界人口达到10亿,1930年世界人口达到20亿(间隔130年),1960年世界人口达到30亿(间隔30年),1974年世界人口达到40亿(间隔14年),1987年世界人口达到50亿(间隔13年),1999年世界人口达到60亿(间隔12年),2011年世界人口达到70亿,预计2025年,世界人口达到80亿,2080年世界人口高达100亿。从上述数据可以看出,人口增长10亿所用时间总体上在缩短,即人口增长幅度在增大,世界人口在快速增长。

在人口不断增长的同时,世界经济也在迅速发展。詹姆斯瓦特(James·Watt)(英国)在1776年发明蒸汽机拉开了煤炭时代的序幕。煤炭作为燃料后,大大促进了铁路运输、海路运输以及纺织行业的发展。在100年后,尼考罗斯·奥古斯特·奥托(Nikolaus August Otto)(德国)发明的内燃机进一步推动了工业革命,加速了人类文明社会的发展,同时也促进了能源大量的开发、输运和利用。据国际货币组织《世界经济展望》报告,2006年世界经济增长率为4.8%,2007年为5.4%,2012年为3.1%,2013年为3.0%。通过这些数据可以判断世界经济近几年虽然在金融危机的影响下增长率放缓,但是仍然在增长。

人口迅速增加,经济飞速发展都必然导致更多的能源需求,造成了当今世界能源短缺的现状;能源大量需求,过度开发又导致生存环境和气候变化等问题——这就是所谓的3E矛盾(如图1-2)。

实际上,3E矛盾是循环的、多重的。人口、经济增长造成能源需求增大,需求增大可能导致能源,特别是常规能源的短缺,能源短缺必然使经济受到抑制,如果通过大规模的开采来满足对能源需求,那么会导致环境恶化,环境恶化也会抑制经济进一步增长。

从图1-2可以看出,能源处在3E的核心位置,如果解决了能源问题,那么3E矛盾也就迎刃而解了。解决能源需求量大、相对短缺的办法主要有:①降低人口数量;②降低能源的供给;③寻找替代能源。降低人口数量从理论上是能够减少对能源的需求,但是目前人口基数大,很难解决能源问题。降低能源供给必然影响经济发展速度,降低人们生活水平,这也是不可取的。寻找替代能源,特别是利用可再生能源和清洁能源,是解决3E问题的有效途径。对于可再生能源不仅不用担心其枯竭问题,而且能够解决由于常规能源大规模开采、总量短缺问题,以及由此产生的一系列不利于经济发展的因素,清洁能源还具有对环境污染小的优点。因此,可再生能源和清洁能源的发展可以在不抑制经济的同时进行能源补给,从而解决了能源、经济和环境的问题。

传统能源的过度不合理消耗不仅造成能源短缺,而且影响了人类社会可持续发展。温室效应、酸雨、臭氧层破坏,以及大气污染等是其最明显的副作用。

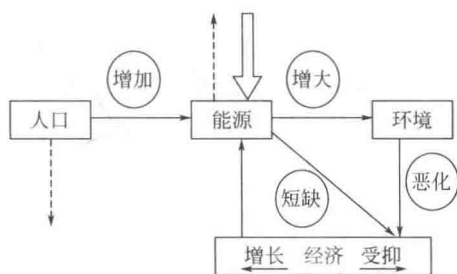


图 1-2 3E 问题示意图

1.3 温室效应

1.3.1 地球温度估算

假设地球表面以及大气层对太阳光的吸收与地球向外辐射的能量相当的情况下，计算地球恒定不变的温度。

在地球大气层外，太阳辐射能流密度：

$$j_{\text{太阳}} = 1.36 \text{ kW/m}^2 \quad (1-1)$$

地球完全吸收的能量流（地球上凸起表面积吸收能量流）：

$$I_{\text{吸收}} = \pi R_e^2 j_{\text{太阳}}, R_e = 6370 \text{ km} \quad (1-2)$$

根据斯蒂芬-波尔兹曼辐射定律，地球辐射进入大气层外的能量流密度为：

$$j_{\text{地球}} = \sigma T_e^4, \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \quad (1-3)$$

整个地球向大气层外辐射的能量流为：

$$I_{\text{辐射}} = 4\pi R_e^2 \sigma T_e^4 \quad (1-4)$$

当 $I_{\text{吸收}} = I_{\text{辐射}}$ 两者相等时，地球表面温度恒定，即 $T_e = 275 \text{ K}$ 。实际上地球平均温度为 288 K ，这与上述估算结果基本一致。

然而考虑到入射太阳辐射中有 30% 被地球外大气反射回了宇宙空间，只有 70% (1000 W/m^2) 的辐射到达地球表层，经估算，地球表面平均温度约为 258 K 。实际地球表面平均温度要较高于此数据，正是由于地球发射辐射能量的部分被大气吸收，未能辐射到大气层外所致。

若假设地球表层吸收所有来自太阳和大气的辐射能量，则地球表面温度高达 54°C 。一旦到达此温度，地球上人类以及现存其他生物将无法生存。而大气在红外吸收区恰恰存在一个对大气辐射较少的窄波段（盲区），地球正是通过该窗口把从太阳获得的热量中 70% 又以长波辐射形式返还宇宙空间，从而维持地面温度不变。

1.3.2 温室效应本质

所谓温室效应（Greenhouse Effect）是指现代化工业社会燃烧更多煤炭、石油、天然气等化石能源产生更多的温室气体，吸收更多的地球辐射，从而导致地球辐射能量返还回宇宙空间的能量减少，造成地球温度变暖的现象。温室气体主要指 CO_2 ，还包括甲烷、臭氧、氮氧化合物、氯氟化合物等。

太阳表面温度约为 6000 K ，其太阳辐射光谱最大值为 $0.5 \mu\text{m}$ ，地球大气中水汽对红外线部分吸收较强烈，臭氧对太阳辐射光谱中紫外线部分较强，而其他气体对太阳辐射光谱吸收较少。因此，通过大气的吸收，太阳辐射被削弱的主要是波长较长的红外线和波长较短的紫外线，而对可见光则影响不大。地球温度较低，地球辐射光谱最大值在红外区，约 $10 \mu\text{m}$ ，地球大气中绝大部分气体，特别是温室气体，在长波部分强烈的吸收阻碍了地球辐射能量向大气层外的“逃逸”。气体吸收了辐射能量的同时向外辐射更长的长波辐射，而其中向下到达地面的部分称为逆辐射，也正是这些逆辐射使地面温度升高，这也可以说是大气对地面起到了保温作用，这就是大气温室效应的原理。

地球温度升高会造成一系列的影响：南北极冰层融化，抬高海平面造成沿海地区低于海

拔高度的地区被淹；冰层融化使得南北极生存的动植物灭绝；地球变暖，令生物的代谢加快，生理周期异常，破坏其自然生长规律。

酸雨是指由于空气污染而造成的酸性降水。空气中大量的硫化物、氮化物经过一系列的反应，最终在雨雪的冲刷、溶解后形成酸雨。酸雨不仅影响人体健康，还会对生态系统、建筑设施存在直接和潜在的危害。酸雨可使儿童免疫功能下降，慢性咽炎、支气管哮喘发病率增加，同时可使老人眼部、呼吸道患病率增加。酸雨还可使农作物大幅度减产，特别是小麦，在酸雨影响下，可减产 13%~34%。大豆、蔬菜也容易受酸雨危害，导致蛋白质含量和产量下降。酸雨对森林和其他植物危害也较大，常使森林和其他植物叶子枯黄、病虫害加重，最终造成大面积死亡。

臭氧层位于地球上 11~48km 的大气平流层中，主要是由臭氧 (O_3) 组成的，它可以有效地吸收来自太阳辐射的对地球生物有害的紫外线。虽然臭氧分子在自然状态下（紫外线作用下）也会少量转化为氧分子和氧原子，但这种转化对臭氧层的影响几乎可忽略。氟氯代烷在高空会解离出氯，而氯可以催化（加速）臭氧转变为氧的反应（这个过程中氯并不消耗），于是臭氧层被破坏了。氟里昂主要是卤代烷烃，常用的是二氯二氟甲烷，虽然氟里昂在空中释放量相对较少，但一个氯原子可破坏 10 万余个臭氧分子，且在大气中可以存在 60~130 年，从而导致平流层臭氧受到破坏，并逐渐减少。没有了臭氧层天然屏障，强烈的紫外线不仅使人死亡，而且会消灭地球上绝大多数物种。

1.4 太阳

太阳是太阳系中最大的物体，其质量约为 2×10^{27} kg，约为地球质量的 33 万倍，太阳直径约为 1.4×10^6 km，约为地球直径的 109 倍。太阳通常被认为有两部分组成：内球和太阳大气。内球又可分为核心、辐射层和对流层，太阳大气由内而外又可分为光球、色球和日冕层（如图 1-3）。

太阳核心区域仅为距离日心 0.25 个太阳半径的区域，即 $0.25R_s$ 。核心区域是产生核聚变反应的区域，是太阳能量的来源，因此该层温度极高，约为 20000000K，密度约为 150000 kg/m^3 。正是由于核心区域温度高、密度大、压力高（约 3000 亿大气压），使得热核

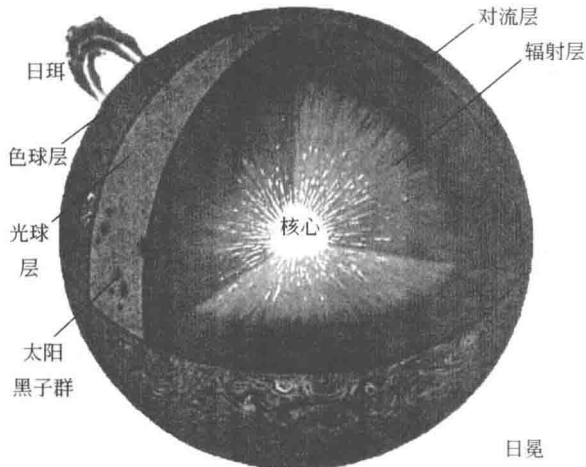


图 1-3 太阳结构示意图

聚变反应得以发生，能够产生极大能量。

从 $0.25R_s$ 到 $0.7R_s$ 区域为太阳的辐射层，来自核心的太阳能量通过该区域以辐射的形式向外传递，该层温度快速降到约为 7000000K ，密度 $1500\text{kg}/\text{m}^3$ 。

从 $0.7R_s$ 以外为太阳内层的对流层，该层温度较低 (500000K)、密度较低 ($150\text{kg}/\text{m}^3$)，由于较大的温差，所以该层以对流的形式把热量传到太阳表面。

太阳光球就是我们平常所看到的太阳圆面，通常所说的太阳半径也是指光球的半径。光球的表面是气态的，其平均密度只有水的几亿分之一，但由于它的厚度达 500km ，所以光球是不透明的。光球层的大气中存在着激烈的活动，用望远镜可以看到光球表面有许多密密麻麻的斑点状结构，很像一颗颗米粒，称之为米粒组织。米粒组织极不稳定，一般持续时间仅为 $5\sim 10\text{min}$ ，其温度要比光球的平均温度高出 $300\sim 400\text{K}$ 。目前认为这种米粒组织是光球下面气体的剧烈对流造成的现象。光球表面另一种著名的活动现象便是太阳黑子。黑子是光球层上的巨大气流旋涡，大多呈现近椭圆形，是太阳光球层上温度相对较低的区域 (约 4000K)，这些温度较低的区域在明亮的光球背景 (约 6000K) 反衬下显得比较暗黑。太阳黑子出现的情况不断变化，这种变化反映了太阳辐射能量的变化。太阳黑子的变化存在复杂的周期现象，平均活动周期为 11.2 年。

太阳色球层位于光球之上，充满磁场的等离子体，厚度约 2500km 。色球层的温度由 4000K 左右的极小值向上增加，到 2000km 左右时停留在 $4000\sim 6000\text{K}$ 之间，在与光球层顶衔接的部分为约 4500K ，到外层达几万摄氏度，密度随高度的增加而减小，整个色球层的结构不均匀，也没有明显的边界。色球层发出的可见光总量不及光球的 1% ，因此人们平常看不到光球，科学家要通过单色光 (6563\AA) 色球望远镜方能观测到太阳色球层。由于磁场的不稳定性，色球层经常产生爆发活动，被称作色球爆发或耀斑，一个耀斑可以在几分钟内发出相当于 10 亿颗氢弹的能量。色球上经常出现一些暗的“飘带”，当他处在太阳表面边缘时，看上去像只耳朵，所以俗称为“日珥”。

日冕是太阳大气的最外层，厚度达到几百万公里，温度有 1000000K 。在高温下，氢、氦等原子已经被电离成带正电的质子、氦原子核和带负电的自由电子等，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。日冕可人为地分为内冕、中冕和外冕 3 层。内冕从色球顶部延伸到 $1.3R_s$ 处；中冕从 $1.3R_s$ 到 $2.3R_s$ ；大于 $2.3R_s$ 处称为外冕。日冕发出的光比色球层的还要弱。

1.5 太阳辐射

组成太阳的主要成分为氢与氦，所占比例分别为 78% 和 20% ，剩下 2% 为其他元素。太阳的能量就是在核心区域依靠氢聚合反应生成氦核的同时释放出巨大能量，具体产能可以根据爱因斯坦质能方程计算，如下所示。

$$E = \Delta mc^2 \quad (1-5)$$

太阳每秒将有 6 亿吨氢参与聚变反应，其发射总功率约为 $3.8 \times 10^{20} \text{MW}$ 。太阳辐射 (Solar Radiation) 的能量决定了地球表面温度，提供了地球与大气层中自然过程的全部能量，其中也包括煤、石油、天然气。因此，太阳辐射对地球上的生命而言是必不可少的。尽管太阳每秒释放如此之大的能量，但是由于其质量巨大，所以估算太阳的寿命长达几十亿年。

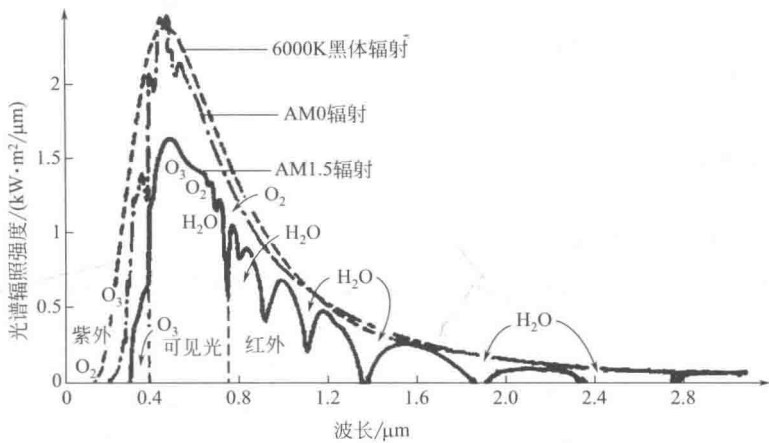


图 1-4 AM0、AM1.5 太阳辐射光谱与 6000K 黑体辐射比较

如图 1-4 所示，太阳辐射光谱基本上是连续的电磁辐射光谱，与黑体辐射光谱 (Blackbody Radiation Spectrum) 相似，其光谱分布由普朗克辐射定律 (Planck's Law of Radiation) 决定：物体吸收热量后辐射总能量增加，而且辐射峰值向短波移动，如图 1-5 所示。最低的曲线表示的是被加热到 3000K 的黑体，温度大约是正常工作时白炽灯钨丝的温度，处于辐射能量峰值波长约为 100nm，属于红外波段，在可见光波段 (390~760nm) 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需要极高的温度，超过绝大部分金属的熔点。

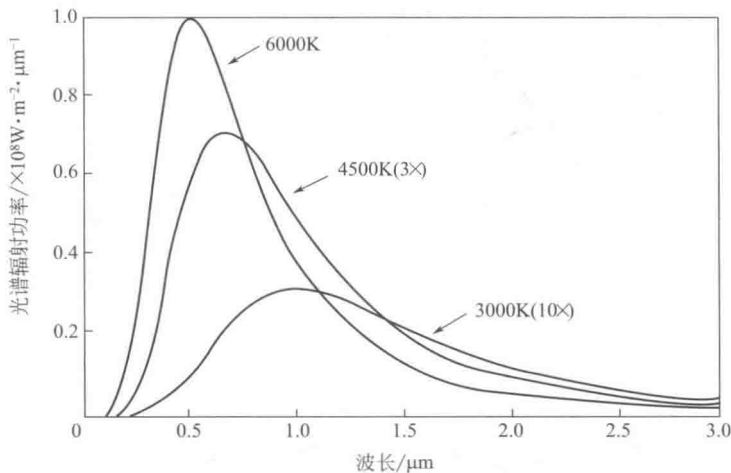


图 1-5 不同黑体温度的普朗克黑体辐射分布

其黑体辐射功率服从普朗克分布 [公式 (1-6) 所示]，单位面积总辐射功率由公式积分所得，如下所示。

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} \quad (1-6)$$

k 为波尔兹曼常数， E 量纲是单位面积单位波长的功率。

$$E = \sigma T^4 \quad (1-7)$$

σ 为斯忒藩-波尔兹曼常数。

太阳辐射光谱中 90% 是波长位于 100~3000nm，大部分属于可见光 (390~760nm) 范