

太 阳 光 发 电

高 橋 清

〔日〕 浜川圭弘 编著

後川昭雄

田小平 李忠馥 魏铁林 译

全英淑 陈德新 李 靖 校

新 时 代 出 版 社

内 容 简 介

本书从太阳能和半导体物理基础入手,系统地介绍了太阳电池和光伏发电系统的原理、设计、制造、测定方法及各种类型太阳电池,同时引用大量资料,介绍世界各国太阳光发电计划、经济技术可行性分析及太阳光发电的未来。本书可供高中以上文化程度从事太阳光发电研究、设计、制造及应用的各类工程技术人员阅读,也可供新能源方面的管理人员、大专院校有关师生学习参考。

太陽光発電

高橋 清 浜川圭弘 後川昭雄 編著

森北出版株式会社 1979

*

太阳光发电

高 橋 清

〔日〕 浜川圭弘 編著

後川昭雄

田小平 李忠勳 魏铁林 译

全英淑 陈德新 李 靖 校

新时代出版社出版 新华书店北京发行所发行

北京昌平上苑长城印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 18.5印张 489千字

1987年12月第1版 1987年12月北京第1次印刷

印数: 0001—4000册

ISBN7-5042-0011-5/TM1 定价: 4.15元

译 者 的 话

太阳光发电是太阳能利用的重要领域之一，它具有无污染、无需燃料运输、应用广泛和多种类型等特点。它作为提供现代用量最大、用途最广的电力资源的一种途经，日益受到世界各国的重视。

自 1954 年美国贝尔实验室研制成功第一个实用的硅太阳能电池，并于其后不久正式用于人造卫星电源以来，世界各国相继投入大量资金和人力，加强研究与开发，使太阳光发电取得惊人的进展。太阳光发电的基本部件——太阳电池，从单晶硅电池发展到多晶硅、非晶硅电池，Ⅲ-V 族、Ⅱ-VI 族化合物半导体太阳电池，薄膜太阳电池，聚光太阳电池，无机、有机太阳电池及光化学电池等，工艺不断创新，转换效率成倍提高，年产量急速增加，成本大幅度降低，太阳光发电系统日趋完善。应用领域也从空间扩展到地面，小至毫瓦级的电子手表、计算器电源，大到数万千瓦的大型太阳光发电站，在生产与生活中发挥越来越大的作用。

为了解、学习、借鉴国外太阳光发电的经验，提高我国太阳光发电的研究、开发和应用水平，我们翻译了这本书。本书由日本太阳光发电领域享有盛名的专家编著，对太阳电池、太阳光发电系统的基本理论、工艺、设计、制造、配套等进行了阐述，并对研究、开发中的新型太阳电池、光发电系统等也作了较为详细的介绍。同时，本书还引用大量资料，介绍了世界各国太阳光发电计划，进行了经济技术可行性分析，展望了太阳光发电的前景。全书内容广泛，结构完整，实用性强，不仅可供从事和将要从事这方面工作的各类工程技术人员阅读，也可作为本专业培训班或大专院校师生的教学参考书，还可为从事这方面的管理人员提供一定资料。

全书共分四篇十六章。第一篇为基础篇，以四章的篇幅介绍了太阳能、半导体物理基础、太阳电池基本理论及太阳电池的测定法。第二篇为各种太阳电池，以六章的篇幅分别介绍了硅太阳电池、带状晶体硅太阳电池、硅薄膜太阳电池、Ⅲ-V族、Ⅲ-V族化合物半导体太阳电池及其他类型太阳电池。第三篇为太阳电池的应用，以二章的篇幅介绍了地面及空间太阳电池电源。第四篇为太阳光发电的未来，以四章的篇幅介绍世界各国太阳光发电计划、太阳光发电的经济技术可行性、太阳光发电系统及太阳光发电的未来。

本书在翻译过程中，得到北京市太阳能所许多同志大力支持，在此表示衷心感谢。

限于水平，难免有不少错误，敬请读者批评指正。

译 者

序 言

目前，世界各国都在努力探索新能源。在新能源中，特别引人注目地是不断地倾注于地球的永久性能源——太阳能。1974年，作为日本国家计划之一的通商产业省的“阳光计划”，开始了太阳能利用技术的研究工作。

利用太阳光的所谓太阳光发电，作为无穷尽的、并且完全无副作用（无公害）的能源，近年来越来越受到人们的重视。实际上，在太阳光发电中起主导作用的太阳电池，是在晶体管刚问世后的本世纪五十年代中期就已发明了。但是，当时地球上的矿物能源还很充足，在能源供给方面简直看不出令人不安的因素。然而，随着地球上能源短缺已开始呈现，人们才重新评价太阳电池的作用，把它作为解救这种危机的特效药。

以社会上对太阳能需求的预测为背景，人们渴望出版与太阳光发电有关的指导性书籍。本书就是应这些需要而写的。

对编排本书的结构，听取了各方面的意见，既要考虑到初学太阳光发电的人们，又要适用于业已实际从事研究开发的人们这两方面。因此，本书不仅涉及到作为太阳电池物理基础的半导体物质的性质，也收集了从基础理论到各种太阳电池的特性、太阳光发电系统以及各国的太阳光发电计划。另外，还尽量编入了许多最新的资料。基于这种思想，我们请活跃在各领域第一线的专家们执笔，这已经是三年前的事情了。所有这些就是本书今天得以问世的经过。因而，一些在执笔时具有崭新内容的东西，现在也一定会有了更新的进展。换言之，它说明在这个领域的研究和开发的进展是何等迅速啊！

本书各章节的调整是由各位编者分别进行的，因此从内容上看，可能和其它章节有若干重复，术语和符号等也未必做到完全

统一。另外，本书的各章是相互独立的，即便不按顺序从第一章开始阅读，也能够单独利用其中某些必要的章节。

本书如能对促成这个患病的地球转变成充满光明与美好的、灿烂辉煌的新世界有所助益，我们将感到由衷的喜悦。

最后，对本书出版工作给予大力支持的通商产业省有关官员和森北出版社表示谢意。

全体编者

1979 年 秋

目 录

第一篇 基 础 篇

第一章	太阳能	1
1.1	地球上的能量资源和供求的预测	1
1.2	太阳能的质与量	3
1.3	地球表面的太阳辐射量与太阳常数	7
1.4	辐射量分布与日照时间	10
第二章	半导体的物理基础	17
2.1	半导体物理基础	17
2.2	半导体结与接触势垒的性质	25
2.3	半导体的吸收系数	33
2.4	少数载流子的寿命	36
2.5	环境对物质性质的影响	41
第三章	太阳能电池基础理论	47
3.1	半导体的光电效应	47
3.2	太阳能电池的能量转换	54
3.3	太阳能电池的构造	57
3.4	光谱灵敏度	59
3.5	短路光电流	70
3.6	开路电压	73
3.7	转换效率	74
3.8	太阳能电池的电流-电压特性	77
3.9	太阳能电池的等效电路	83
3.10	太阳能电池常用材料	89
第四章	太阳能电池测定法	97
4.1	序	97
4.2	标准太阳光和采光条件	99
4.3	标准太阳能电池的设置	132

4.4	太阳电池的标准测定法	139
4.5	光谱灵敏度特性的测定及其他	145
4.6	串联电阻、扩散长度及寿命的测定	149

第二篇 各种太阳电池

第五章	硅太阳电池	153
5.1	前言	153
5.2	结型硅太阳电池	154
5.3	非结型硅太阳电池	163
5.4	多结型太阳电池	168
5.5	异质结型太阳电池	174
第六章	带状晶体硅太阳电池	182
6.1	带状晶体生长法的历史	182
6.2	EFG 法的原理与现状	187
6.3	带状晶体生长技术	190
6.4	用 EFG 法得到的带状晶体硅的特性	198
6.5	利用 EFG 带状晶体的太阳电池	203
6.6	结束语	207
第七章	硅薄膜太阳电池	209
7.1	薄膜太阳电池的结构与特点	209
7.2	硅薄膜在各种衬底材料上的形成及其性质	213
7.3	薄膜太阳电池的结构及其特性	225
7.4	非晶硅薄膜太阳电池	243
第八章	Ⅲ-V 族化合物半导体太阳电池	250
8.1	GaAs 太阳电池的特征	250
8.2	GaAs 太阳电池的研究经过	252
8.3	异质结太阳电池	256
8.4	GaAs 薄膜太阳电池	276
8.5	结束语	280
第九章	Ⅱ-VI 族化合物半导体太阳电池	285
9.1	Ⅱ-VI 族半导体太阳电池的特征	285
9.2	CJS/Cu ₂ S 系 列太阳电池	286

9.3 CdS/CdTe 系列太阳电池	290
9.4 CdS/InP 系列太阳电池	296
9.5 CdTe/Cu ₂ Te 系列太阳电池	299
9.6 其它类型的太阳电池	302
9.7 小结	304
第十章 其它太阳电池	309
10.1 无机太阳电池	309
10.2 有机太阳电池	312
10.3 半导体-电解液太阳电池	320
10.4 光化学电池	323

第三篇 太阳电池的应用

第十一章 地面用太阳电池电源	336
11.1 太阳电池组件	336
11.2 地面用太阳电池电源的设计	342
11.3 地面用太阳电池装置的试验	357
11.4 地面用太阳电池电源的应用	363
11.5 聚光型太阳电池装置	367
11.6 民用太阳电池	382
第十二章 空间用太阳电池电源	386
12.1 前言	386
12.2 宇宙环境	392
12.3 用于宇宙空间的太阳电池片	405
12.4 日本卫星上装载的太阳电池板	425
12.5 环境试验	432
12.6 地面试验	434
12.7 飞行结果	438

第四篇 太阳光发电的未来

第十三章 世界各国的太阳光发电计划	444
13.1 美国的开发计划	444
13.2 日本及欧洲各国的开发计划	450

13.3	发展中国家的开发计划	470
第十四章 以经济的观点分析比较各种太阳		
	电池发电的可行性	481
14.1	前言	481
14.2	单晶硅太阳能电池	485
14.3	带晶硅太阳能电池	495
14.4	硅薄膜太阳能电池	505
14.5	聚光型太阳能电池	511
14.6	Ⅱ-Ⅵ族薄膜太阳能电池	519
14.7	Ⅲ-V族太阳能电池	524
14.8	太阳光发电的电力成本	532
14.9	结束语	533
第十五章 太阳光发电系统		
15.1	太阳能电池发电系统实用化的现状	538
15.2	太阳能电池发电系统的考虑方法	541
15.3	太阳能电池发电系统的基本构成	543
15.4	太阳能电池发电系统的构成	545
15.5	家用太阳能电池发电系统	556
15.6	对系统的评价	561
15.7	太阳能电池发电系统目前存在的问题与未来展望	564
第十六章 展望太阳光发电的未来		
16.1	宇宙发电计划(SSPS-卫星太阳能电站)	566
16.2	混合太阳能系统	572
16.3	展望太阳光发电的未来	576

第一篇 基础篇

第一章 太 阳 能

1.1 地球上的能量资源和供求的预测

随着文化的发展,在原始时代就懂得使用火的人类发现,可以通过各种形式将能量用于日常生活之中。至今,每人每年能源消费量的多少,几乎可以用来作为衡量一个国家文明进步的尺度。

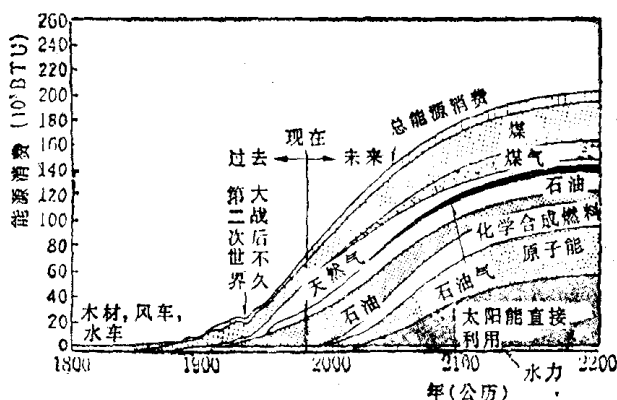


图1.1 美国历年的能量消费和未来的供求预测及其能源细目^[1]

图 1.1 表示美国年能源消费量、以往利用的能源分类和对未来能源需求的预测^[1]。另外,我们还把从美国商业部的调查结果中、引用 1966 年世界及美国年消耗电力的实际情况和 1980 年及 2000 年的预测数据汇集于表 1.1^[2]中。表 1.1 中 1966 年全美国电力消耗量为 1.06×10^{12} kWh, 其中火力发电约占 80%, 水力发电约占 17%, 其余是靠原子能发电。另一方面, 对于 1980 年的

表1.1 1966 年电力消耗量和代之以太阳能电池发电时所
需电池的等效面积及据此对未来需求量所作的推算值

	1966 年		1980 年		2000年	
	电 能	等效面积 (10^{12} kWh)(mile ²) ^①	电 能	等效面积 (10^{12} kWh) (mile ²)	电 能	等效面积 (10^{12} kWh) (mile ²)
全 世 界	3.34	105	6.50	204	20~30	630~946
美 国	1.06	33	2.74	86	9.0	284
东北部海岸	0.22	6	0.50	16	1.20	38
纽 约 市	0.04	1	0.08	2	0.19	6

设太阳能电池的转换效率为10%^②

① 原文中mil²系mile之误。——译者

② 原文中 100%系10%之误。——译者

同类细目中，所需总电力与 1966 年相比，几乎增加一倍半。然而，预计依靠开发水力资源可提供的增加部分，与 1966 年相比，充其量为 50% 左右。供给未来电力的能源，可以说几乎都不得不依赖于火力或原子能。在这样状况下，如图 1.1 对未来的预测所表明的那样，煤、石油、天然气等蕴藏于地下的资源终究会枯竭。同时，将这样的有机物（碳氢化合物）作为燃料能源时，必须考虑防止燃烧时产生的公害，这样，今后电力成本将会越来越高。因此，大量消费地下资源的状况已无法再持续下去了。

人们经常用地球上的“粮食危机”引证说明人口问题，并发出警告：到二十一世纪中叶，地球上的人口将达到 100 亿。然而文明的进步较之人口的增长更快，全世界能量需求的预测⁽³⁾如图 1.2 所示，对人口的增长进行累加后将出现更急剧的上升，这种情况表明“能源危机”比“粮食危机”来得更快。

那么，现代社会中应用最广泛、最便利的电能，就将更急剧地增长。图 1.3 表示美国能源需求总量和其中对电力需求的预测⁽⁴⁾。当前，美国每人消耗的能量相当于世界上人均消耗能量的

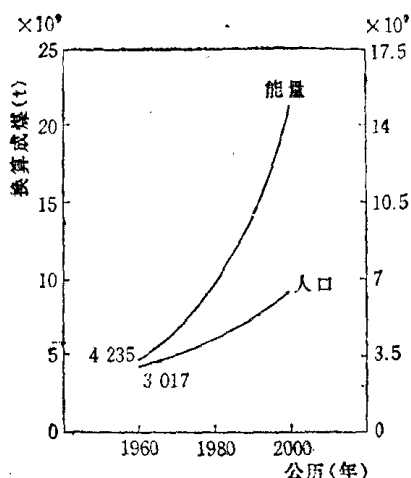


图1.2 未来地球上人口总数及全世界总能量消费的预测

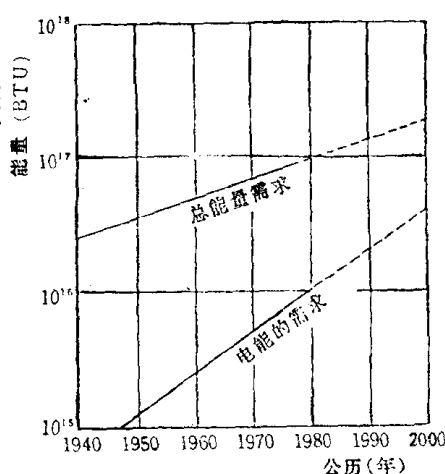


图1.3 美国年能源总需求及过去耗电量的实况和对未来的预测(单位: BTU(英国热量单位) = 252卡)

6 倍。根据美国总统的能源咨文,今后将采取竭力限制能源消费的政策。即使这样,预计到公元 2000 年时,能源需求总量仍将增加一倍左右,而电力需求则将成为现在的五倍。在这种状况下,从本世纪五十年代就已提出的利用太阳能研究计划,正是以五十年代的原子能研究和六十年代的宇宙空间研究成果为基础,着眼于太阳能没有公害且取之不尽、用之不竭的性质,应用八十年代的技术,使之实现实用化。这就是这个计划的本来面目。

1.2 太阳能的质与量

我们地球上的生物,本来就是依靠太阳能抚育成长的。因此,毫无疑问,太阳能对于人类来说没有公害且取之不尽、用之不竭。而人类社会常把太阳能称为洁净的能源。

到达地球表面的太阳能,是通过几乎处于真空状态的宇宙,以电磁波的形式传播过来的。假如考虑地球和太阳之间平均距离为一亿五千万公里,太阳光在地球表面就几乎是平行光,从电磁学的角度说,即可认为是平面波的集合。太阳的能谱具有很宽的

频域, 但进入大气层之后, 从X射线到宇宙射线的高能粒子, 因散射而损失掉, 于是到达地面的直射光部分具有与约 5700K 的黑体辐射能谱几乎一致的连续能谱分布, 如图 1.4 所示。然而, 从测量太阳电磁波导出的温度将更高 (见图 1.7), 这是由于太阳的活动使温度发生很大变化, 因此, 从太阳辐射过来的光能, 一般可按图 1.4 的能谱分布处理。

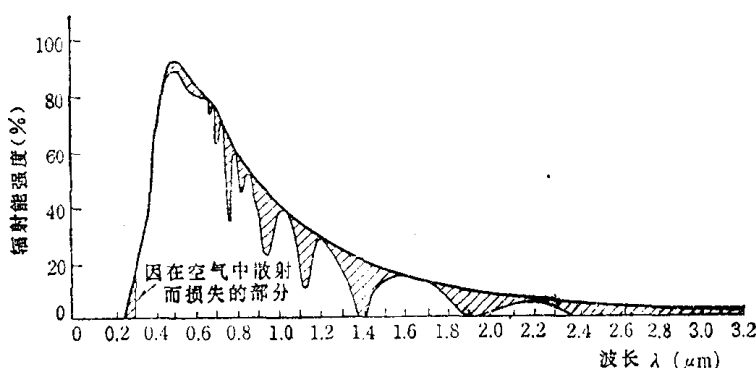


图1.4 地球表面的太阳能谱分布

其次, 我们来考虑一下太阳辐射能量。每单位时间内从太阳表面辐射出来的能量, 换算成电能后可推断为 $3.8 \times 10^{23} \text{ kW}$ 左右。太阳辐射能通过约一亿五千万公里的宇宙到达地球大气层附近时, 辐射能量密度为 1.4 kW/m^2 (准确地讲应为 1.395 kW/m^2) 左右。这个值称为太阳常数 (Solar Constant), 是由人造卫星实测得到的。从而, 到达地球的总辐射能即为这个太阳常数与地球的投影面积的乘积。地球的长半轴为 6378km 短半轴为 6356km, 是近似于球的椭圆球体。试以短半轴计算, 则总辐射能为 $177 \times 10^{12} \text{ kW}$ 。设将这些投射到地球上的太阳能为 100%, 则图 1.5 表示它在地球上的分配和损失^[6]。如图所示, 投射到地球的太阳辐射能, 其中约 30% ($52 \times 10^{12} \text{ kW}$) 以光的形式再次被反射到宇宙中去。假如从阿波罗宇宙飞船上看地球, 因为地球上 有海有云, 反射率比月球表面要高得多, 理所当然, 此时的地球就像发出蓝色光辉的月球, 光彩夺目, 蔚为壮观。剩余约 70% 的太阳辐射能

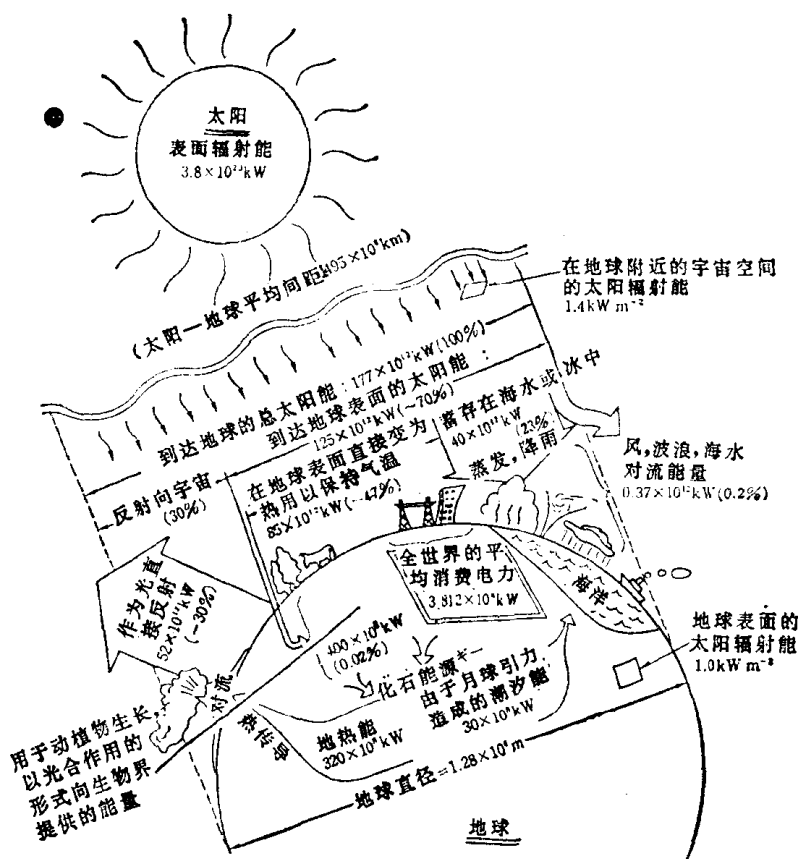


图1.5 太阳辐射能量与地球从中所获得的能量⁽⁶⁾

到达地球表面。而其中有 47% 在地球表面直接变为热, 用以保持气温; 再有 23% 储存在海水或冰中, 其中一部分用于水的蒸发, 形成云或雨。所有这些, 与我们生活有密切的关系、可供使用的风能、波浪能、海水对流能仅占 0.2%, 约为 $0.37 \times 10^{12} \text{ kW}$ 。再有, 以光合作用的形式向生物界提供能量, 用于地球上的动植物生长繁衍的太阳辐射能更是微乎其微, 只占上述 0.2% 的 1/10, 即 0.02%, 约为 $400 \times 10^8 \text{ kW}$ 。

地球上生物的活动 (包括我们人类的活动在内), 一般是极

● 原图中 $1.28 \times 10^6 \text{ m}$ 系 $1.28 \times 10^7 \text{ m}$ 之误。——译者

其单纯的。二氧化碳和水通过太阳光能作用,产生有机物的植物;呼吸植物光合作用时排出的氧气,并食用这些植物的动物;以及分解植物或动物的排泄物或尸体,作为植物或动物的养料,再次返还于生物界的微生物。这三者交织进行,循环不止,进行着生物体系的运动。气象能与这个生物体系循环的能量相比要大得多,只要它产生极小的不平衡,就会使生物体系的地理分布发生变化。由于这些变化,太阳能以间接的形式又对死亡的生物体系发生作用,形成了石油、煤炭等矿物能源。

地球上拥有的能源,除太阳能外,还有地球本身具有的地热能和地球与月球的引力作用造成的潮汐能两种。地热能是从地球内部通过热传导和温泉、火山活动等直接传到地表的热能,总共只有 $320 \times 10^8 \text{ kW}$ 。潮汐能比它还小一个数量级,估计约为 $30 \times 10^8 \text{ kW}$ 。因此,可以认为地球上拥有的能量中 99.98% ^[6]是由太阳辐射能提供的。

那末,与上述自然能相比,人类文明活动所消费的人工能源应为多少呢?试以1965年全世界电力消耗量为基础,计算结果约为 $3.8 \times 10^8 \text{ kW}$,这个值与投射到地球上的太阳总能量相比,约小5个数量级,仅相当于与风力、波浪等气象活动有关的能量的 $1/1000$ 。可见,我们人类文明活动所需要的能量与地球上接受的太阳能相比,是非常微小的。但是,应注意以上讨论的只是平均数值,假如考虑局部情况,如人工能量消费密度竟达到平均值的1000倍以上,那么,它也会影响到那个地区的气象条件。例如,设现在火力发电站的总效率为35%,这样,要生产35万kW的电量,就意味着有相当65万kW的能量以热的形式散发于周围环境,就有可能使局部环境受到破坏。即使对于不排放烟尘或气体的原子能发电,也同样存在这样的热公害的问题。当然,对所谓洁净能源的太阳光——热发电,为提高能量转换效率,有必要采用某些方法提高能量密度,再进行转换,当这种方法形成一定大的规模时,也会产生同样的热公害,这是现在就必须周密考虑并认真对待的一个问题。

1.3 地球表面的太阳辐射量与太阳常数

上节所述的太阳能是将到达地球表面的全部能量在地球截面上的积分, 因此, 可以说是辐射总量。实际上, 地球的某个地方、某个时刻接受的辐射量, 由于受到当地纬度、经度、时间、空气状态及气象条件等各种因素的影响, 时时刻刻在发生变化。这样, 辐射量随日射所通过的大气状态的不同, 发生很大变化。因此, 人们规定在不受大气影响的大气层外测定的辐射称为太阳常数。即当地球与太阳的平均距离为 $1.495 \times 10^8 \text{ km}$ (约一亿五千万公里) 时, 设地球大气层对辐射没有吸收或散射, 此时在与太阳辐射的入射方向垂直的平面上, 每平方厘米每分钟内入射的太阳辐射量定义为太阳常数。

太阳常数的标准值是采用美国国家航空与航天局 (NASA) 最近用人造卫星的实测值, 为 $1.98 \text{ ly}^\bullet / \text{min} = 138.0 \text{ mW/cm}^2 = 1.380 \times 10^6 \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{s} = 128.0 \text{ W/ft}^2 \bullet$ 。

大气层外的太阳辐射包括 X 射线 (波长 $\lambda < 10 \text{ \AA}$) 以及从极短紫外线 ($10 \text{ \AA} \sim 2000 \text{ \AA}$) 到中紫外线 ($2000 \text{ \AA} \sim 3150 \text{ \AA}$) 的短波光, 但这些辐射由于受到超高层大气中的分子及臭氧的散射和吸收, 到达地面的最短波长为 $3000 \text{ \AA}$ 左右。为此, 地球表面的辐射能量密度为 $86 \sim 100 \text{ mW/cm}^2$ 。

入射到地球表面的辐射量, 除受地球大气层的影响外, 首先随天文学的因素变化而改变。图 1.6 表示在地球的不同纬度上各月辐射量的分布。曲线表示的值是 ly/d , 即一日内一平方厘米的水平面内入射的卡数。实际上, 入射到地球表面的辐射量通过大气层时还将受到各种衰减。

辐射通过对流层时, 水蒸汽和臭氧对其产生明显的吸收效应。水蒸汽的吸收集中于辐射的长波一侧, 即近红外区, 在比较狭窄

● ly 是 langly 的缩写符号, 相当于 cal/cm^2 。

● 苏联在距地面 30 km 的上空测定的太阳常数, 确认也具有相同的成果。