

硅太阳能电池及其应用

黄锡坚等 编

中国铁道出版社

1985年·北京

内 容 简 介

全书共分六章。主要内容包括：能源的开发、太阳电池发电原理和硅太阳电池的主要性能、硅太阳电池电源系统、硅太阳电池在铁路信号、通信方面的应用以及硅太阳电池应用概况介绍。

可供从事铁路信号、通信及其他方面电源设计工作的工程技术人员阅读。

硅太阳电池及其应用

黄锡坚等 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 魏京燕 倪嘉寒 封面设计 王毓平

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米^{1/32} 印张：6.25 字数：135千

1985年9月 第1版 第1次印刷

印数：0001—3,000册 定价：1.15元

目 录

第一章	能源的开发	1
一、	能源的需要	1
二、	太阳能的利用	3
三、	太阳辐射基础知识	8
四、	太阳电池的分类和发展	26
第二章	太阳电池发电原理和硅太阳电池的 主要性能	30
一、	半导体的性质	30
二、	P-N结的光生伏特效应	38
三、	硅太阳电池的主要性能	45
四、	硅太阳电池的结构	52
第三章	硅太阳电池电源系统	59
一、	电源系统的组成	59
二、	容量计算	92
三、	测试	120
四、	安装	128
第四章	硅太阳电池在铁路信号上的应用	130
一、	小站臂板电锁器联锁和区间半自动闭塞 信号电源	130
二、	小站电气集中信号电源	138
三、	道口信号电源	148
四、	区间自动闭塞和调度集中信号电源	153
五、	探测器电源	154

第一章 能源的开发

一、能源的需要

电、光、热、机械运动、原子核裂变、物质化合分解等各种物理和化学能的利用，构成了人类物质生活的基础。我们把一切能够为人类社会提供这些能量的源泉统称为能源。从我们的祖先学会利用火这种最原始的能源开始，到今天人们能够控制和利用原子能等更高级的能源，中间经过了一段很长的历史过程；在这期间，发生过多次能源的变革，而每一次的变革都标志着重大的技术革命，推动了社会进步。十八世纪蒸气机的发明和煤炭的大量使用，导致了欧洲英、法等国的产业革命。接着，电力的发明和应用，又对人类的生产活动产生了巨大的推动作用。五十年代以来，许多工业国家开始大量利用廉价石油作动力和原料，生产了大量工业产品。但自七十年代以来石油价格提高了十几倍，大大震撼了西方世界，从而在世界范围内掀起了研究能源现状和开发各种能源的热潮。

地球上究竟有那些能源可供开发和利用呢？我们通常将地球上的各种能源划分为下列两大类：

一类为一次性能源，这类能源消耗后，在百万年内是不会再恢复的；

另一类为可再生能源，这类能源在使用中，在长达百万年以上的时间里，都可以不断地从大自然或靠人力获得补充。

一次性能源主要包括矿物燃料（煤炭、石油、天然气）、原子核裂变和地热能；可再生能源主要包括生物能（沼气）、水力（水坝、潮汐）、风力、太阳能、原子核聚变。有些能源的分类是可变的，例如我们放慢提取地热的速度。做到在理论上足以使地心及时补充所损失的热量时，地热能就可成为可再生能源。

我们又把现今常用的能源称为常规能源或传统能源新开发的能源称为新能源。煤炭、石油、天然气等这些矿物燃料，是现代工农业生产的主要动力，也是我们日常衣食住行必不可少的，在常规能源中占主要部分。但是，它们是一次性能源，终究有耗尽的一天。根据统计分析，全世界各种燃料的储藏量估计有：

天然气—— $10Q^*$ ；

石油—— $33Q$ ；

铀—— $70Q$ ；

煤炭—— $170Q$ 。

在过去接近二千年的时间里，全世界总共消耗了约 $18Q$ 的能量，平均每年消耗 $0.009Q$ 。而自从西欧产业革命以来的一百年里，全世界消耗了接近 $9Q$ 的能量，平均每年消耗约为上述平均值的10倍。1850年全世界一年的耗能量是 $0.01Q$ ，而到1970年的年耗能量已增加到 $0.17Q$ 。专家们分析，现在已形成每隔 $10\sim 12$ 年，年耗能量便成倍增长。今后能源的消耗必然还会更迅速地增长，显然在此形势下，不能指望地下矿物燃料无止境地供我们永远使用。

煤炭、石油、天然气燃烧时，在大气中会增加许多对人类有害的气体，破坏了大气中二氧化碳和氧气的自然平衡，

* $Q = 2.93 \times 10^{14} \text{ k W} \cdot \text{h}$

估计全世界的年耗能量达到 $3Q$ 时，将使大气平均温度升高，冰山溶解，海平面上升，对地球表面的生态平衡将产生许多不良的后果。

石油、煤炭等燃料又都是我们现代物质生活中，许许多多必需品诸如衣料、医药、食品、肥料、塑料制品等的原材料，把它们单纯作为燃料付之一炬，也实在可惜。

因此以利用太阳能为中心的开发各种新能源的研究活动，正在世界各地蓬勃地展开，人类即将跨入新的能源利用时代。

在我国，现在每年人均能源消费量不足 $1t$ 标准煤，虽仅为世界水平的一半。但能源利用效率很低，与世界先进水平相比几乎低 50% 。因此我们除必须增加传统能源生产外，还需努力提高它们的利用率。但从长远来看，尽早着手开发新能源，包括太阳能、生物能、地热能、海洋能、风能和核能等等，作为传统能源的补充和替代，实为当务之急。

二、太阳能的利用

在各种新能源中，特别引人注目的是太阳能。实际上地球的一切能源，除了原子能和地热能外，追根究底，无不渊源于太阳能，图 1—1 表示了太阳能进入和离开地球表面的能流。

从图中可以看出，太阳辐射能到达地面之前，已有一部分被地球上空的大气层吸收和反射 ($52 \times 10^{16}W$)；到达地面的太阳辐射能，有一部分以光和热的形式贮存在各种物质之中 ($81 \times 10^{16}W$)；在水和冰中以热能形式贮藏的能量也占有较大的数量；有一部分能量则成为风、水波、气流的原动力，形成气候变化并造成地球上水的循环；还有一部分太阳辐射能通过植物的光合作用，以化学能形式贮存在植物机

体，也进而到达动物机体中，在有利的地理条件下，经过数百万年的自然演变，埋藏于地下成为我们现在常用的煤、石油、天然气等矿物燃料。

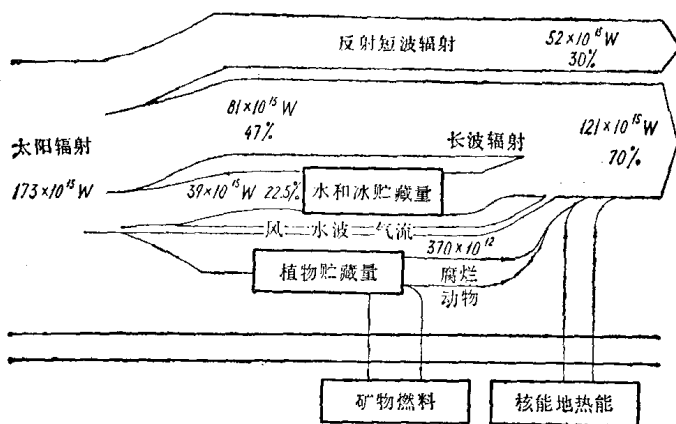


图 1—1 在地球上的太阳辐射能流

太阳能是一个十分巨大而又洁净的自然能源，每天大约有 $4 \times 10^{15} \text{ kWh}$ 的太阳能辐射到地球的大气层上方来，约等于地球上的石油储藏量的 $1/3$ 或 $1/4$ ，而且经分析计算表明，这样大的能量可以持续不断地供给地球 6×10^{10} 年之久，可以说是取之不尽，用之不竭的了。太阳能还有一个特点是，它不从地球带走任何物质，也不带来任何污染，而是有光有热，地球上的一切生物都靠它来维持生命，所以它又是一个十分洁净的能源。此外它还具有分布广阔，容易取得等优点。但是它也有一些先天性的不足，例如它的能量密度低，每平方米面积只能收集到 1 kW 左右的太阳能；它受日夜、季节气候、地理环境等的影响而变化，给使用带来不方便等等。

人类利用太阳能有着悠久的历史，据我国古籍书记载，

远在公元前十一世纪，我国西周时代的劳动人民就发明了一种形似凹面镜的金属圆盘，用来会聚阳光点燃艾绒等物，称为“阳燧取火”。“阳燧”就是金属凹面镜，是人类利用太阳能的杰出发明之一。在西方也传说着一个有趣的故事。那是公元前214年，古罗马帝国派出了一支舰队攻打西西里岛东部的西拉修斯商埠，著名的科学家阿基米德当时参加了岛上希腊人的反抗，他让每个士兵都拿一块磨亮的盾牌，面对太阳，把照在盾牌上的阳光，反射聚集在罗马舰船上，使它起火而焚毁。这虽是传说，无法考证是否确有其事。但在一、二十年前，已被希腊科学家证实用数十面 2.3m^2 的镜子，用同样的方法能把45m远的木船烧着起火。

西晋年代，我国已有利用凸透镜聚焦特性的记载，晋代张华著的《博物志》一书这样说：“削冰命圆，举以向日，以艾承其影，则得火”。大家都知道，冰熔于火，而我们的祖先，却把冰制成凸透镜，用来取火，充分显示了我国人民的聪明才智。

公元前一世纪，埃及的亚历山大城利用太阳能将空气加热膨胀，从而把尼罗河的水提升到较高处，供农田灌溉之用，这是太阳能动力应用的开始。1700年意大利人利用太阳热溶解钻石；1774年有一位法国人用两块透镜使阳光聚焦熔化金属；1920年美国开始使用太阳能热水器；1938年世界第一座太阳能取暖房建成；1949年世界第一座太阳能高炉在法国建成，可产生 3500°C 高温；1957年苏联第一次在人造地球卫星上利用太阳电池作为卫星的电源，揭开了太阳电池发展的序幕。

我国在五十年代就开始对太阳灶、太阳热水器和太阳电池进行研究，不过当时进展较慢。1974年在上海召开了部分省市参加的太阳能利用经验交流会，1975年又在河南省安阳

市召开了全国第一次太阳能利用经验交流会。这两次会议促进了我国太阳能利用事业的发展，逐渐形成了太阳能研究与利用的热潮。现在能源科学已被列为全国重点科研项目之一，太阳能的利用进一步得到各方面的关心和支持，太阳能专业研究机构和工厂相继建立，初步形成了一支专业科技队伍。1979年在西安召开了全国第二次太阳能利用经验交流会，制定了全国太阳能科学技术发展长远规划，接着又成立了中国太阳能学会，促使太阳能的利用事业加速度地向前发展。

根据截止到1979年年底的统计：全国热水器的总采光面积达到67,000m²以上；长期使用的太阳灶有2,000多台；全国有一半以上的省市开展了太阳能干燥的试验，用于烘干粮食和其他农副产品，以及木材、建筑材料等工业产品，初步取得了成效；甘肃、青海两省建设了几幢太阳能采暖房，实测表明，太阳能采暖在北方寒冷地区是有效的，能够显著降低取暖燃料消费量。

硅太阳能电池在航运系统，铁路系统及其它系统得到了比较广泛的应用。在海岸线上，安装了3,000W的航标太阳能电源设备，提高了灯光的亮度和稳定性，使用效果很好；太阳电池还用来制成橡胶割胶灯、诱虫黑光灯、电牧栏、野外遥测自动记录仪表、电视差转机、炮兵指挥仪、游艇以及边防战士营房、西北牧区牧民生活等的电源，使用效果也都很好。

我国铁路现有车站数千个，其中约三分之一的车站是采用臂板电锁器联锁。这些车站大都是没有交流电源或没有可靠交流电源。其信号设备或是点油灯，或是用甲电池、空气电池供电，在目前情况下短期内还是难以获得可靠的交流电源。为了改变铁路信号的这种落后面貌，从1975年以来，在

上百个车站的个别信号机以至全站信号设备上，开始采用硅太阳电池供电，这里按其发展情况，分两个阶段叙述如下：

1975年至1979年为第一阶段，在这个阶段，广州铁路局首先在一架预告信号机上安装了硅太阳电池，随后陆续有9个铁路局在20个车站的信号设备上，安装了38套硅太阳电池电源装置，太阳电池总的安装容量约为1200W_p。另外在青藏铁路一个3股道车站上，结合省电的电气集中和轨道电路，安装了720W_p硅太阳电池方阵，作为供给全站信号设备用电的试点，配套蓄电池为碱性铁镍蓄电池，额定电压为24V，并设有备用柴油发电机组和可控硅整流器，较高电压的负载如电动转辙机、色灯信号机、半自动闭塞线路电源等则采用大功率晶体管构成的直流变换器升压供电。这是目前在铁路中应用的最大的一套太阳电池供电系统，从1979年投入运行以来，至今一直在正常工作。

从这个阶段，铁路系统采用的硅太阳电池以来，绝大多数的电池至今仍在正常运行。使用表明，硅太阳电池电源能保证信号设备有足够的供电电压，并且电压特性平稳，提高了信号显示距离，而且维护管理简单。

1980年到现在是第二阶段，在这个阶段，全国除了少数几个交流电源条件较好，或阴雨天较多的铁路局之外，已有接近三分之二的铁路局，在一些信号和通信设备上采用硅太阳电池供电。这个阶段每年平均安装的硅太阳电池容量约为第一阶段年平均安装容量的4倍；并由第一阶段的单架臂板预告信号机上试用，发展为在2~4股道的臂板电锁器联锁车站的信号设备全部采用硅太阳电池供电。例如呼和浩特铁路局在管内某些干线上无交流电源的车站内兰州铁路局在一些道口上试用了硅太阳电池电源，效果是比较好的。

现在硅太阳电池已逐渐推广用作铁路列车调度无线电话

电源、过河通信电缆标志灯电源、工务和车务手提信号灯的充电电源。

三、太阳辐射基础知识

应用太阳能和太阳电池，需要先了解有关太阳辐射的性能，因此，这里将其基础知识介绍如下。

(一) 太阳的构造和太阳能的传递

太阳是距地球最近的一颗恒星。它是一个硕大而炽热的球体，直径约 $139 \times 10^4 \text{ km}$ ，是地球的109倍，质量为 $1.982 \times 10^{27} \text{ t}$ ，比地球大33万多倍，而密度却只是地球的 $\frac{1}{4}$ 。

太阳表面有效温度是5762K，越向中心温度越高，中心温度可达 $4000 \times 10^5 \text{ K}$ ，压力为 2000亿大气压。由于太阳的温度极高，压力很大，这里的物质全都离子化了，不同元素的原子核在高温高压下，激烈运动，相互碰撞，不断地进行着原子核反应。

现代科学证明：原子核在分裂（核裂变反应）或是在结合（核聚变反应）时，释放出巨大的能量。太阳内部存在着大量的氢，在碳、氮的参加下，产生类似氢弹爆炸那样的热核反应，从而释放出巨大的能量，以粒子辐射和电磁波辐射的形式向外传输，这就是太阳能的来源。根据斯蒂芬-波尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 定律，太阳辐射的总功率可由太阳半径 R ，太阳表面有效温度 T_s 和斯蒂芬-波尔兹曼常数 σ_s (σ_s 等于 $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) 等参数，按照太阳辐射总功率等于 $4\pi R^2 \times \sigma_s \times T_s^4$ 的关系，求得为 $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ ；如果把太阳表面用一层 12m厚的冰包起来，只要 1 min 就可以把冰壳全部融化，可见其能量之大了。

能量的传递有传导、对流和辐射三种基本方式，传导和

对流需要借助物质的分子、原子或电子作媒介，这两种方式在真空中是无法传递的。地球离太阳十分遥远，平均为 $14953 \times 10^4 \text{ km}$ ，这样远的距离，光也要走 8 分多钟。而这个空间绝大部分都是真空地带，在这样的条件下，唯一传递太阳能的方式只能是辐射。辐射传递能量不需要通过任何物质作媒介。相反，在传递空间遇到任何介质，都会被介质吸收、散射和反射而削弱传递的能量。辐射传递速度相当于光速，即等于 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

辐射通量与距离的平方成反比，可用下式表示：

$$S_R = \frac{R_0^2}{R^2} \cdot S_{R_0} \quad (1-1)$$

式中 R_0 ——地球与太阳之间的平均距离，简称日地平均距离 (km)；

R ——实际的日地距离 (km)；

S_{R_0} ——日地平均距离情况下的太阳辐射通量 (W)；

S_R ——实际日地距离情况下的太阳辐射通量 (W)。

我们知道，地球除自转外，还以椭圆形轨道围绕太阳旋转，所以实际的日地距离 R 每天都在变化，例如：

1月1日 147001000km (最短)

4月1日 149501000km

7月1日 152003000km (最长)

10月1日 149501000km

由此引起辐射通量的变化为 $\pm 3.5\%$ ，如图 1—2 所示。

太阳能是从太阳向四面八方辐射的，每秒到达地球大气外层的能量约为 $173 \times 10^{12} \text{ kW}$ (可由太阳常数 I_0 和等于 $6,371 \text{ km}$ 的地球半径 R_e ，按照到达地球大气外层的太阳辐射功率等于 $I_0 \times \pi R_e^2$ 的关系求得)，此功率虽仅占太阳辐射总功率的 $1/21 \times 10^9$ 左右，而全年累计的能量已达到

5320Q，是目前人类每年消耗能量的20,000倍以上。这些能量穿透大气层时，要被大气反射和吸收而损失一部分，尽管如此，到达地球表面的太阳辐射功率还有 $116 \times 10^{12} \text{kW}$ 左右。

(二) 太阳辐射的波长

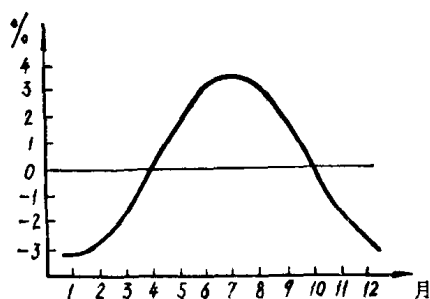


图 1—2 将辐射通量修正到日地平均距离情况下的订正值年变程

一切物体，只要在绝对温度 0 K （即为 -273°C ）以上，都具有向外辐射能量的能力；同时也在吸收来自其它物体的辐射能。物体辐射能力的大小，取决于物体本身温度的高低。实验表明，辐射能力与温度的四次方成正比。

辐射是以电磁波的形式进行的。电磁辐射具有各种波长，从 $10^{-10} \mu\text{m}$ 的宇宙射线到长达数千 km 的交流电和长波振荡都是辐射的波长范围（见图 1—3）。

波长的计量单位通常是 μm ，也有用埃 (\AA) 的，它们之间的换算关系是：

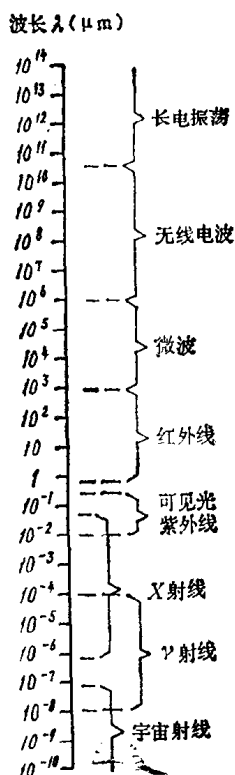


图 1—3 各种辐射的波长范围

$$1 \text{ \AA} = 10^{-1} \text{ nm} = 10^{-4} \mu\text{m} = 10^{-7} \text{ mm}$$

太阳辐射的波长可划分为几个波段。只有从 $0.4\mu\text{m}$ 到 $0.75\mu\text{m}$ 波长的电磁辐射才能引起人的视觉，这个波段称为可见光谱。不同波长的电磁辐射对人眼产生不同的颜色感觉，视觉正常的人，在光亮条件下能看到可见光谱的各种颜色，表 1—1 是各种颜色的光波波长范围。

波长小于 $0.4\mu\text{m}$ 的辐射称为紫外波段；波长大于 $0.75\mu\text{m}$ 的辐射称为红外波段。

以辐射能量强度和辐射波长为坐标绘制的曲线称为太阳光谱的能量分布曲线（见图 1—4）。从图 1—4 可以看出，尽管太阳辐射的波长范围很宽，而绝大部分能量却集中在 $0.22 \sim 4 \mu\text{m}$ 波段，占总能量的 99%，其中可见光段占 43%，红外段占 48.3%，紫外段占 8.7%。能量分布最大值对应的波长是 $0.475\mu\text{m}$ 。

在太阳辐射测量中，经常采用下列两个物理量：

辐射通量——单位时间内以辐射方式发送、传递或接收的能量。在国际单位制中，其计量单位为 W 或 mW；

辐照度（有时也称为辐射通量密度）——单位面积上的辐射通量，计量单位为 W/m^2 ，或 $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。由于这些单位太小，世界气象组织仪器和观测方法委员会建议采用大 10 倍的单位，即 mW/cm^2 作为辐射通量密度的单位。我国气象部门通常采用 $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ 或 $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{d}$ （或月、年）为单位。

各色光的波长范围

表 1—1

光的颜色	大致的波长范围 (nm)
红	640~750
橙	600~640
黄	550~600
绿	480~550
青	450~480
蓝	430~450
紫	400~430

它们之间的换算关系是:

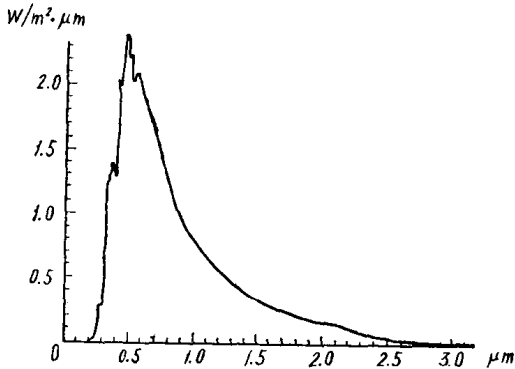


图 1—4 大气上界的太阳光谱能量分布

$$\begin{aligned} 1 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min} &= 69.78 \text{ mW/cm}^2 \\ &= 697.8 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

或者

$$\begin{aligned} 1 \text{ mW/cm}^2 &= 10 \text{ W/m}^2 \\ &= 0.01433 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min} \end{aligned}$$

如果测量只限于可见光范围, 此时辐射的度量单位可采用光度学单位, 相应的有:

光通量——单位时间内发送、传递或接收的光能, 计量单位为 lm ;

照度——单位面积上的光通量, 计量单位为 lx , 即 lm/m^2 。

太阳本身是活动体, 其能量也在波动地变化, 不过其中可见光部分、近紫外线部分和近红外线部分的辐射能量随着太阳活动的变化甚微。据测量, 在太阳活动峰值年仅比太阳活动宁静年增大2.5%, 这三部分的能量约占太阳辐射总能量的90%, 因此可以把太阳辐射看作是稳定的, 由此提出了太阳常数这一概念。

太阳常数是在日地平均距离处，地球大气上界垂直于光线的平面上所接收到的太阳辐射通量。太阳常数是实际测量得到的数值，随着测量技术的不断提高而越来越精确。近年来，利用卫星、火箭和高空气球观测得到的太阳常数为 $1.94\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$ 或是 $135.3\text{mW}/\text{cm}^2$ (等于 $1.353\text{kW}/\text{m}^2$)。这是按照全年中每天平均为24h的条件下得到的，而全年的能量总数是 $1.186\text{kW}\cdot\text{h}/\text{cm}^2$ 。

太阳辐射中的无线电波部分，紫外线部分和微粒子流部分的能量则是随太阳活动的变化而剧烈地变化。例如紫外线的强度随太阳活动的变化在几十倍至几百倍之间。

(三) 大气层的影响

地球外围存在着大气层，太阳辐射能到达地球表面之前，必须通过大气层。太阳辐射能在遇到大气层的各种成分时，一部分被反射回宇宙空间，一部分被吸收，一部分被散射，使到达地球表面的太阳辐射能，不论在量上还是在光谱能量分布上都发生不同程度的减弱和变化。因此，在研究太阳辐射时，了解大气层对太阳辐射的影响是很重要的。

大气层对太阳辐射的反射作用取决于两个方面，其一是大气散射方向与入射方向相反的散射。包括水汽分子、小水滴以及灰尘杂质等粗粒子散射所造成的反射，这部分的反射能力约占平均太阳常数的7%左右。其二是云层的反射，云的反射能力变化很大，它随云量、云状和云厚的变化而变化。按地球平均云量为54%计算，太阳辐射有近似1/4的能量被云层反射回宇宙空间。

从地面(海面)的太阳辐射光谱能量分布曲线(图1—5)可以看出：透过大气层的能量分布曲线有较大的变化，这主要是被大气层所包含的氧(O_2)、臭氧(O_3)、水汽(H_2O)、二氧化碳(CO_2)等吸收的缘故，图中斜线阴

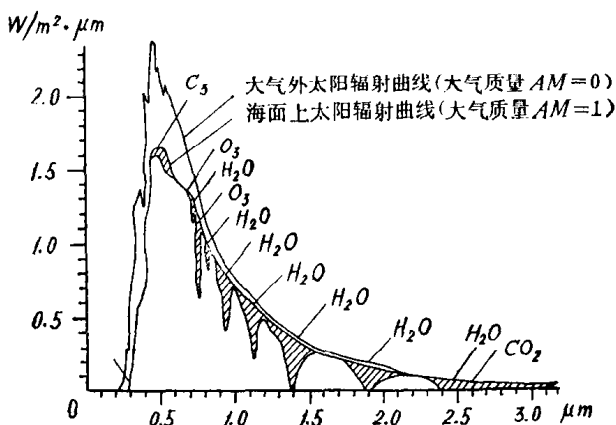


图 1—5 通过大气层后的太阳辐射光谱能量分布曲线

影部分表示相对应成分吸收的能量。

分析大气层的吸收作用，需要了解大气各种成分的吸收特性。

氧 (O_2)：大气中约含有21%的氧。氧吸收太阳辐射集中在波长小于 $0.2\mu\text{m}$ 的紫外线区内，超出了硅太阳能电池的光谱响应范围。

臭氧 (O_3)：主要集中在 $10\sim 40\text{km}$ 的高层大气中，低层大气几乎无臭氧存在；它的分布是不均匀的，而且随纬度、时间而变化。臭氧在太阳辐射能量分布范围内，从紫外线的边缘到红外线的极远区都有吸收带。主要吸收带有两个，一是波长介于 $0.2\sim 0.32\mu\text{m}$ 之间最强的一个吸收带，从观测到的太阳光谱能量分布曲线中，发现在 $0.3\mu\text{m}$ 处突然中断，这一段的大量紫外线几乎全部被臭氧吸收；另一个吸收带则在可见光区，波长为 $0.6\mu\text{m}$ 附近，在这个吸收带，吸收的比例不很大，但它是太阳辐射最强的区域，所以它吸收的绝对值要比另外一些区域吸收的绝对值大一些。臭氧吸收了