

太阳电池及其应用

赵富鑫 主编
魏彦章

国防工业出版社

内 容 简 介

本书比较全面地介绍了太阳电池的原理、设计、制造、测试以及应用实例，同时介绍了国内外一些新型太阳电池的研究情况。可供具有高中以上文化程度的从事太阳电池研究、设计、制造及实际应用的各类工程技术人员阅读，也可供大专院校师生作为新能源方面的教学参考书。

太阳电池及其应用

赵高鑫

魏彦章 主编

责任编辑 杨其眉

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 12 $7/8$ 插页 1 319 千字

1985年2月第一版 1985年2月第一次印刷 印数：0,001—5,000册

统一书号：15034·2705 定价：2.40元

目 录

符号表	1
第一章 太阳辐射能	5
§ 1.1 太阳的结构和太阳辐射能的来源	5
§ 1.2 大气层外的太阳辐射光谱(AM 0)	6
§ 1.3 地球表面上的太阳辐射光谱(AM1, AM1.5, AM2)	6
§ 1.4 日照量的计算和测量	10
§ 1.5 太阳能的特点	13
§ 1.6 世界和我国太阳能资源的分布情况	14
第二章 太阳电池原理	17
§ 2.1 太阳电池的分类	17
§ 2.2 太阳电池的物理基础	18
§ 2.3 太阳电池材料的光学性质	46
§ 2.4 同质结太阳电池	55
§ 2.5 肖特基结太阳电池	103
§ 2.6 异质结太阳电池	120
第三章 硅太阳电池工艺	137
§ 3.1 硅材料的选择	137
§ 3.2 硅片的表面准备	141
§ 3.3 制结	145
§ 3.4 除去背结	157
§ 3.5 制作上、下电极	160
§ 3.6 腐蚀周边	173
§ 3.7 蒸镀减反射膜	174
第四章 太阳电池的标定和测量	186
§ 4.1 太阳电池的标定	186
§ 4.2 复现	197
§ 4.3 光谱响应的测量	202

§ 4.4	太阳电池伏安曲线及串联电阻的测量	207
§ 4.5	基区少子扩散长度和寿命的测量	213
第五章	太阳电池发电系统	217
§ 5.1	概述	217
§ 5.2	太阳电池组件	220
§ 5.3	太阳电池组件的封装材料	228
§ 5.4	太阳电池组件的制造工艺过程	232
§ 5.5	蓄电池	237
§ 5.6	太阳电池发电系统的设计	246
§ 5.7	太阳电池方阵/蓄电池电源系统的测量	253
第六章	其它太阳电池	255
§ 6.1	硫化镉薄膜太阳电池	255
§ 6.2	多晶硅太阳电池	262
§ 6.3	带(片)状硅和薄膜硅太阳电池	267
§ 6.4	多结太阳电池	280
§ 6.5	导体-绝缘体-半导体太阳电池	288
§ 6.6	无定形硅太阳电池	297
§ 6.7	光电化学电池	303
第七章	聚光太阳电池和聚光系统	314
§ 7.1	聚光硅太阳电池	315
§ 7.2	各种聚光太阳电池	328
§ 7.3	太阳聚光器	339
§ 7.4	太阳跟踪装置	349
第八章	太阳电池的实际应用	359
§ 8.1	卫星电源和空间电站	359
§ 8.2	航标灯电源	366
§ 8.3	铁路信号灯电源	369
§ 8.4	农牧业设备电源	371
§ 8.5	广播、电视、通信设备电源	377
§ 8.6	太阳电池的其它应用	385
§ 8.7	使用、维护和保养	390
附录		392

附录 1	太阳辐射能量光谱分布数据	392
附录 2	一些重要太阳电池材料的特性	396
附录 3	硅掺杂浓度和电阻率的关系	398
附录 4	太阳电池的分类及其主要参数	399
后记		402

符 号 表

A	p-n结二极管曲线因子
A^*	有效理查森常数
A_s	单体太阳电池有效面积
A_t	单体太阳电池总面积
A_m	组件太阳电池总面积
C_s	表面浓度
c	光速
C	结电容
D	大气层高度
$D(D_n, D_p)$	扩散系数(电子、空穴)
E_0	真空中静止电子能级
E_c	导带底能级
E_v	价带顶能级
$E_F(E_{Fn}, E_{Fp})$	费米能级(n区、p区费米能级)
E_i	本征费米能级
E_r	复合中心能级
E_g	禁带宽度
ϵ	电场强度
F, F	填充因数
G_L	光生载流子产生率
H	电池总厚度(只考虑半导体)
$H' = (H - X_n - W)$	基区厚度(总厚度减去扩散层及耗尽层厚度)
h	普朗克恒量
I	光强
$I(J)$	电流强度(电流密度)

$I_L(J_L)$	光生电流(电流密度)
$I_m(J_m)$	最大功率点电流(电流密度)
$I_0(J_0)$	反向饱和电流(电流密度)
$I_D(J_D)$	二极管的暗电流(电流密度)
$I_{ss}(J_{ss})$	短路电流(电流密度)
J_F	正偏压电流密度
J_V	反偏压电流密度
J_t	隧穿暗电流密度
k	玻尔兹曼恒量
K	辐射损伤系数
$L(L_n, L_p)$	扩散长度(电子、空穴)
AM	大气质量
m	异质结暗电流曲线因子
m_e^*, m_p^*	电子、空穴有效质量
N_A	受主浓度
N_c	导带态密度
N_v	价带态密度
N_D	施主浓度
N_t	复合中心密度
N_{ph}	光源光谱中每平方厘米每秒光子总数
N_1, N_2	异质结两侧的掺杂浓度
n	肖特基势垒中的暗电流曲线因子
n	折射率
$n(n_n, n_p)$	电子浓度(n 区、 p 区电子浓度)
n_i	本征载流子浓度
P_m	最佳输出功率
P_{in}	输入功率密度
P_{out}	输出功率密度
$P(P_0)$	气压(海平面标准气压)
Q	量子产额(一个光子激发出一对光生电子、空

	穴的几率)
Q	电荷
$\tilde{Q}$	光谱因子
q	单位电荷电量
R	反射率
$R_{\square}$	方块电阻
$R(R_s, R_{sh})$	电阻(串联电阻、并联电阻)
R_m	最佳负载电阻
$S(S_n, S_p)$	表面复合速度(电子、空穴)
T	温度
T	光的透射率
t	时间
r	复合速率
V_D	内建电压
V_j	结的耗尽区端电压
V_m	最佳功率点电压
V_{oc}	开路电压
W	耗尽区宽度
$W(W_m, W_s)$	功函数(金属、半导体的功函数)
X	聚光倍数
x_j	结深
$U(U_n, U_p)$	复合率(n 区、 p 区中的复合率)
$\epsilon(\epsilon_0, \epsilon_r)$	介电常数(真空介电常数、相对介电常数)
λ	波长
ν	频率
$\Phi(\lambda)$	光谱辐照度(即在波长 λ 处、单位带宽中入射光子的能流密度)
ϕ	辐射通量
ϕ_m	肖特基势垒高度
$\rho(\rho_{sh})$	电导率(薄层电导率)

η	光电转换效率
δ	薄层厚度
$\sigma (\sigma_n, \sigma_p)$	俘获截面(电子、空穴)
$\tau (\tau_n, \tau_p)$	少子寿命(电子、空穴)
$\mu (\mu_n, \mu_p)$	载流子迁移率(电子、空穴)
χ	电子亲和势
V_t	电子热运动速度
$\alpha (\lambda)$	材料对波长为 λ 的光的吸收系数
α	太阳高度角
α	电流温度系数
β	电压温度系数
z	太阳天顶角

第一章 太阳辐射能

太阳是一个巨大的能源，它以光辐射的形式每秒钟向太空发射约 3.8×10^{20} MW能量，有22亿分之一投射到地球上，太阳光被大气层反射、吸收之后，还有70%透射到地面。尽管如此，地球上一年中接收到的太阳能仍然高达 1.8×10^{18} kW·h。

对于直接利用太阳光发电的太阳电池来说，太阳辐射的光谱、能量以及太阳辐射的变化情况与太阳电池的输出功率密切相关。本章将简单介绍太阳的结构、太阳辐射能的来源，然后重点讨论到达地球大气层外和地面上的太阳能的构成及其计算和测量，最后简述太阳能的特点，并列出国和世界太阳能分布情况。

§ 1.1 太阳的结构和太阳辐射能的来源

太阳和地球都是由相同元素组成的。太阳内部最多的是氢和氦，其次是碳、氧和各种金属元素。太阳的直径为 8.65×10^5 km，质量约为 10^{34} t，平均密度约为 1400 kg/cm^3 。太阳的内部结构至今尚未全部了解清楚，总的讲是一个高温高压下的气体团。平时眼睛看到的是太阳的表面层，称为光球，温度约为 $6000 \text{ K}^{(1,2)}$ 。光球外面是色球层。从光球开始愈向内部温度愈高，压强及密度也愈大。一般认为在太阳中心区一直进行着激烈而复杂的热核反应，依靠由轻元素聚合成重元素时，因总质量减少而释放出的巨大能量，使中心区的温度高达 $1.4 \times 10^7 \text{ K}$ 。热核反应释放出的能量，主要以光辐射的形式穿透光球层和色球层向太空辐射。这种辐射已经进行了几十亿年，在今后的几十亿年中还要继续辐射而不会有什么变化。

太阳本身在不停地变化和运动，如太阳表面有黑子（温度较低的区域）和耀斑（温度较高的区域）的活动，其数量多寡以十

一年为周期。太阳自转的周期，在日面赤道带约为25天，而在两极约为35天。

太阳离地球平均距离为 $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ ，冬至点最近，夏至点最远，相差约为平均距离的6%。因为地球自转轴与公转轨道平面法线间的夹角为 23.5° ，冬至点时太阳在地球南回归线天顶，尽管这时日地距离最近，北半球仍处于冬季。夏至点时太阳回到北回归线天顶，所以北半球是夏季。

§ 1.2 大气层外的太阳辐射光谱 (AM0)

由于日地距离的变化，在地球大气层上垂直于太阳辐射方向的单位面积上接收到的功率在 132.8 mW/cm^2 到 141.8 mW/cm^2 之间。这种辐射的波长约从 $0.1 \mu\text{m}$ 直到几百 μm 。为了统一标准，定义在平均日地距离处，垂直于太阳辐射方向的单位面积上接收到的太阳总辐照度为太阳常数，其数值为 $1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$ 。这是许多国家使用气球、火箭、人造卫星对太阳辐射进行大量测试，综合而得到的公认数据。与此同时还确定了满足太阳常数数值的太阳辐照度按波长的分布表（见附录1），根据此表可画出太阳光的光谱分布曲线（如图1-1）。

在地球大气层外接收到的太阳辐射，未受到地球大气层的反射和吸收，称为大气质量为零时的辐射，以AM0表示。图1-1给出的光谱称为AM0光谱条件或AM0光谱。

§ 1.3 地球表面上的太阳辐射光谱 (AM1, AM1.5, AM2)

太阳辐射在到达地球表面之前，必须通过大气层。大气层除了成分固定的气体氮、氧、氢、氦等外，还有成分不固定的气体分子如水汽、臭氧、二氧化碳，及悬浮的固体微粒如烟、尘埃、花粉等等，这些微粒也是形成云的核心。太阳辐射通过大气层时，就被这些分子及微粒所吸收、散射或反射，因而太阳辐照度将被削弱。

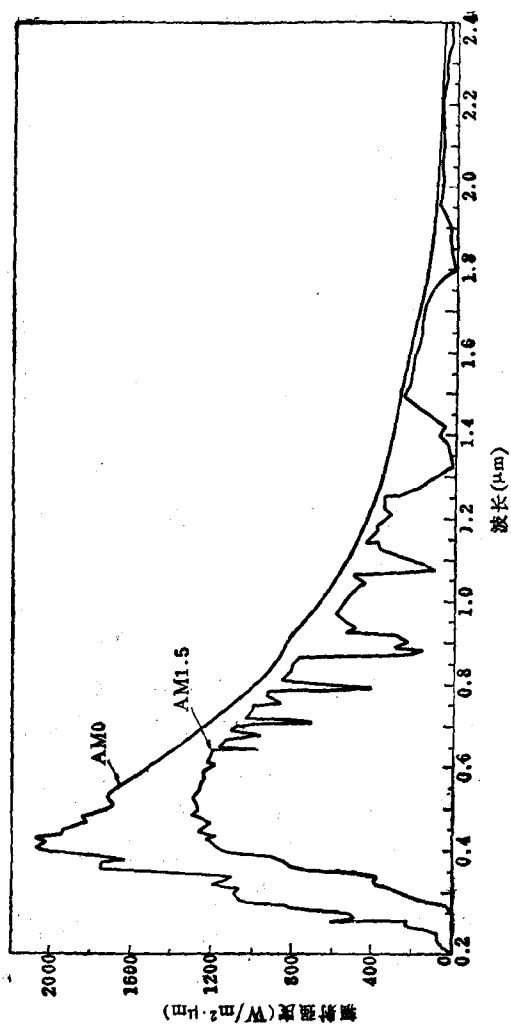


图1-1 太阳辐射光谱

这种削弱还与太阳辐射穿透大气层的距离有关，这又决定于太阳辐射的方向，通常用大气质量 (AM) 这个名词来表示上述情况。如图1-2所示，假定大气有一定的厚度 D ，如果太阳以天顶角 Z 斜入射 (此时太阳高度角为 α)，那么太阳光通过大气层的距离可以近似表示为

$$d = D \sec Z$$

令
$$AM = \frac{d}{D} = \sec Z$$

用大气质量 AM 表示太阳光通过大气的距离。当 $Z = 0$ 时, $AM = 1$, 称大气质量为 1, 用 AM1 表示。当 $Z = 48.2^\circ$, $AM = 1.5$; $Z =$

60° , $AM = 2$, 分别用 AM1.5 和 AM2 表示大气质量为 1.5 和 2。

在不同的大气质量下，垂直于太阳入射方向的单位面积上得到的太阳光谱，分别称为 AM1、AM1.5、AM2 太阳光谱。显然，一年之内 AM1 光谱只有太阳在南、北回归线之间的某个时刻才能获得，而 AM1.5 的太阳光谱则在地球上的大部分地区均可以得到。

但是大气层的影响不仅与太

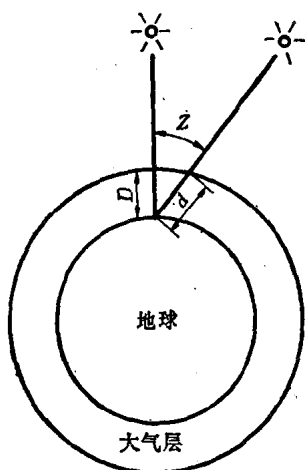


图1-2 太阳光入射到地球表面

阳光的入射方向有关，而且还与大气中吸收、散射、反射太阳辐射的物质多少有关，这直接依赖于气象及大气污染情况，是非常复杂的。

先看大气的吸收作用。大气的主要吸收物质是氧 (O_2)、臭氧 (O_3) 及水汽 (H_2O)。大气中含有 21% 的氧，氧吸收波长小于 $0.2 \mu m$ 的紫外光，在 $0.155 \mu m$ 处吸收最强。由于这种吸收，在地面光辐射中几乎观察不到 $0.2 \mu m$ 以下的辐射。臭氧主要存在于 $10 \sim 40 km$ 的高层大气中，在 $20 \sim 25 km$ 处最多，低层大气中几乎没有。臭氧在整个光谱范围内都有吸收，主要有两个吸收带，一个是

0.20~0.32 μm 间的强吸收带，另一个在可见光区的0.6 μm 处，虽然吸收因数不太大，但恰好在辐射最强区，所以臭氧的吸收要占总辐照度的2.1%左右。水汽是太阳辐射的主要吸收媒质，吸收带在红外及可见光区，水汽的吸收约占总辐照度的20%。此外，尘埃也有一定的吸收作用，但通常很小。

其次是大气的散射作用。太阳辐射经过大气层时，将被各种气体分子、水分子(云雾)、尘埃等散射。散射不同于吸收，不会把辐射能转变为粒子热运动的动能，而仅是改变辐射方向，使直射光变为漫射光，甚至使太阳辐射逸出大气层而不能到达地面。散射对辐照度的影响随散射粒子的尺寸而变，一般可分为两种。一种为分子散射，散射粒子小于辐射波长，散射强度与波长的四次方成反比。大气对长波光的散射较弱，即透明度较大；而对短波光的散射较强，即透明度较小。天空有时呈蓝色就是由于短波光散射所致。另一种是微粒散射，散射粒子大于辐射波长，随着波长的增大，散射强度也增强，而长波与短波间散射的差别也愈小，甚至出现长波散射强于短波散射的情况。空气比较混浊时，天空呈乳白色，甚至呈红色，就是这种散射的结果。这种粒子散射通常用“混浊度”来表示。

大气的反射主要是云层反射，这随云量、云状与云厚而不同，平均讲云层的反射因数可至50%或更大，因此云层对太阳辐射的影响很大，而且随着气候的变化而变，是很不规则的。此外，如附近有高大的建筑物，则还有建筑物表面上的反射。

综上所述，虽然我们可用AM1、AM1.5、AM2等名词来说明大气对太阳辐照度的影响，但实际测量表明，即便大气质量相同，所得到的光谱各异。为了统一标准，一般都沿用萨克卡拉(Thekaekara)假设的大气模型，对AM0太阳光谱加一个损失因子，由计算机计算得到AM1.5光谱(见图1-1)。我国一些单位也已采用，作为太阳电池地面应用的测试标准。AM1.5曲线中的不连续部分为各种不同大气组份对太阳光的吸收带。附录1给出的AM1.5光谱积分能量为83.5mW/cm²。直到现在还有许多

文献引用 AM1 太阳光谱和 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 的数据作为测试标准。

§ 1.4 日照量的计算和测量

从地面上看, 太阳在一天之内从东到西环绕地球, 而只在正午时才在南北向的水平面内。即使在此时刻, 由于赤道与黄道不在一个平面 (成 23.5° 角), 各地纬度又不同, 因而太阳仍不在天顶 (北半球偏向南方, 而南半球偏向北方)。偏角随纬度而变, 也随一天中的时间、一年中的季节而变。探测面上得到的太阳辐照度, 一般小于 AM1 辐照度值。任何时刻太阳光的辐照度为

$$I = I_0 \cos \psi$$

这里 I_0 为垂直受光面的太阳辐照度的最大值, 而 ψ 为太阳方向与受光面法线间的夹角。事实上, 在不同 ψ 角时, 太阳光所通过的大气层距离不同, 因而 I_0 也不同, 所以还应当用大气质量修正。

现在我们从上式近似计算一天中探测面所受到的太阳能总辐射量 (每单位面积), 这个量一般称为辐照量, 单位可用 $\text{W} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ 或 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。显然辐照量等于

$$S = 2 \int_0^{T/2} I_0(\psi) \cos \psi dt$$

这里 T 为从日出到日落的时间。

现在主要的问题是确定 ψ 与时间的函数关系, 从而可以计算上式中的积分。 ψ 与时间的关系比较复杂, 这里分为四种情况讨论, 并在某些地方采用一些近似。

- (1) 受光面水平, 而且固定;
- (2) 受光面向南 (在北半球) 或向北 (南半球) 倾斜, 倾角 ϕ 固定, 也可按季节调节;
- (3) 受光面向南或向北倾斜, 倾角固定, 但是可绕一竖直轴旋转, 因而可以从早到晚始终追踪太阳, 称为东西向追踪;
- (4) 受光面可绕竖直轴也可绕水平轴旋转, 因而可始终正对太阳, 即任何时刻 ψ 都为零, 称为全追踪。

(1) 情况如图1-3所示, 我们可把太阳光与受光面法线间的夹角 ψ 分为在南北子午面上的角 ψ' 及东西面上的角 θ , 前者由于太阳的南北向运动而后者则由于太阳的东西向运动所致。从图可得

$$\tan^2 \psi = \tan^2 \psi' + \tan^2 \theta$$

由于太阳南北向运动较小, 因此可用一天中 ψ' 角的平均值代入上式, 但 θ 角则随时自东向西作 180° 的变更, 我们可以把它写成

$$\theta = (1 - 2t/T) \frac{\pi}{2}$$

式中 t 从日出时量起, 在积分时 t 的上下限为0到 π , 这样我们就可求得一天内总日照量的最大值(即晴天无云时的值)。因为上式中的 I_0 与纬度有关, 故这里的总日照量也随纬度而变。

(2) 情况与上述情况大体相似, 所不同的只是因为受光面与水平面成倾角 ϕ , 因此角 ψ 的南北向分量不是 ψ' , 而是 $\psi' - \phi$, 由图1-4可知

$$\tan^2 \psi = \tan^2 (\psi' - \phi) + \tan^2 \theta$$

θ 仍用上面的表示式, 从而可求得总日照量。显然这总日照量与受光面的倾角 ϕ 有关, 而对于每一纬度有一最佳的 ϕ 值。对于任一 ϕ 值, 总日照量也与纬度有关。

(3) 情况因受光面总在东西向追踪太阳, 故在任何时刻 θ 一定为零, 因而有

$$\psi = \psi' - \phi = \text{常数}$$

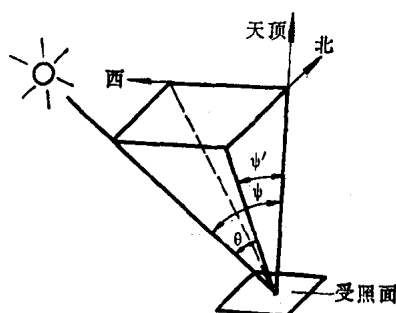


图1-3 受照面水平放置

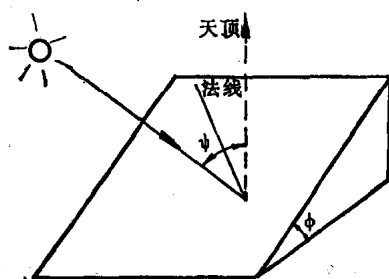


图1-4 受照面倾斜放置

(4) 情况时显然

$$\theta = 0, \psi' = 0$$

分别对这四种情况进行积分, 即可得到各种情况下的总日照量, 计算结果用图 1-5 所示曲线表示。图中画出受光面不追踪、东西向追踪及全追踪时的最大总日照量与纬度的关系, 其中受光面不完全追踪时, 与地面成最佳倾角。从图中可以看出, 总日照量最大值与纬度略有关系, 即随纬度的增加而减小。在图中所示纬度范围内, 这种变化不太大, 但在高纬度范围, 日照量将大大地减小。使用追踪方法可以相当大地增加总日照量, 但全追踪与东西向追踪差别很小, 而前者的设备比后者复杂得多, 从经济观点出发, 全追踪不一定是需要的。

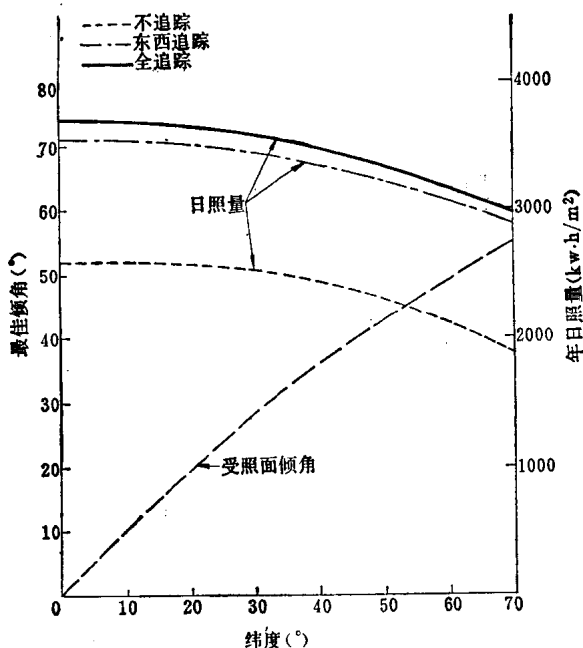


图1-5 不同追踪情况下所得日照量与纬度的关系

这里还要着重指出, 这里计算的总日照量是最大值, 也就是全年都是晴朗无云时的理想值, 因此实际日照量要比计算值小得