

8027  
华北理工大学出版社

TAIYANGDIANCHI

YUANLI

YUXINJIAN

易新建

# 太阳电池原理与设计

# 太阳电池原理与设计

易新建

华中理工大学出版社

# 太阳电池原理与设计

易新建

责任编辑 傅岚亭

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 9.15 字数: 218 000

1989年1月第1版 1989年1月第1次印刷

印数: 1 1 500

ISBN 7-5609-0256-1/TM·19

定价: 1.85元

## 序 言

世界上能量的消耗在不断增长，目前美国年增长率为7%，日本为10%，我国大约4%。世界上的能源供应约44%来自石油，30%来自固体燃料（煤等），18%来自天然气，而水力、原子能等只占8%。地壳中贮藏的石油和煤的数量有限，按目前的能耗率计算，不出30年石油将全部用完，煤最多也只用200年，所以寻找和开发新能源乃是一项刻不容缓的任务。目前世界各国对太阳电池以及其他新能源（如风力、地热等）的大力开发和研究，就是在这种形势下产生和发展起来的。

太阳电池是将照射在电池表面上的太阳光直接转变成电能的装置。它是不会枯竭的，加之使用时无大气和放射性污染，因而受到国内外的普遍重视。它的发展，60年代首先应用在空间技术方面，成功地用作人造卫星的工作电源，近十多年来的研究，集中于把它开发成为地面新能源。具体目标是研制效率高和成本低的太阳电池，即要求太阳能转变成电能的效率高，而每瓦造价同使用煤或石油所花的成本差不多。

本书的内容主要集中在太阳电池的工作原理与设计上。此外，对于当今的水平 and 动向也作了扼要的介绍。在整个书中特别强调器件原理和把这些原理应用于器件的设计。这样使读者不仅能了解器件的运行规律，同时也能根据实际需要，独立解决设计中所遇到的问题，做到理论和实践的统一。对于一些基本概念论述，力求深入浅出，便于自学。在各章节中，指出

基本的和最新的参考文献，供读者查阅和深化。

本书共分十章。第一章讨论太阳辐射与电池性能参数；第二章研究光的吸收以及载流子的产生与复合；第三章论述光电方程和光谱响应；第四章探讨器件的伏-安特性和研究各种暗电流机理；第五章分析电池效率，它是器件性能的最重要的参数；第六章讨论电池的设计考虑，主要讨论材料性质对器件设计参数的影响和构成电池的各部分的设计参数选择；第七章介绍硅单晶同质结电池，它是目前研究得最成熟、在空间和地面都应用很广的一种器件；第八章探讨异质结电池，它是80年代器件发展的方向；第九章论述表面势垒电池，包括肖特基器件(SBD)、金属-绝缘体-半导体(MIS)器件和半导体-绝缘体-半导体(SIS)器件等；最后，第十章研究薄膜电池，包括多晶和无定形薄膜器件，它们由于制造简便，成本低廉而受到重视。全书内容的安排，前五章主要讨论器件原理，后五章结合原理，阐明器件设计考虑和目前的发展水平及研究动向。

国外近十年来在这个领域已出版了四本有代表性的著作，1975年H.J.Hovel著《太阳电池》，1981年S.J.Fonash著《太阳电池器件物理》，1982年M.A.Green著《太阳电池理论、工艺和应用》和1983年A.L.Fahrenbruch and R.H.Bube合著《太阳电池基础》。此外，国际上每隔一年半召开一次最权威的IEEE光伏专家会议（第十八届于1985年10月在美国拉斯维加斯召开）。同时，各种形式的讨论会也频繁举行，例如1986年8月在我国首都北京举行了第二届国际太阳电池科学和工程会议（第一届于1985年在日本举行）。上述专著和讨论会所发表的会议录给编写此书提供了丰富的素材，作者希望此书的出版不仅能够阐明太阳电池的工作原理和设计考虑，而且也能充分反映近年在这个领域的发展水平和研究动

向。

作者非常感谢Ting L. Chu, Chirley S. Chu, Yutang Yang, L. Book等美籍教授和日本博士K. Mochizuki等在撰写本书过程中所提出的宝贵意见和提供的丰富的国外参考资料。此外，武汉大学张烽生副教授审阅了全书和提出了不少有价值的修改意见，我的同事潘正达等同志给予了大力协助，作者亦表示衷心的感谢。

由于作者的水平和经验有限，书中一定有不少缺点和错误，敬希同行专家和读者批评指正。

编者 1987年8月

## 重要符号和单位表

$A_0$	二极管因子
$a$	晶格常数 (nm)
$C$	电容 (F)
$D_p$	p型材料中, 电子扩散系数 ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
$D_n$	n型材料中, 空穴扩散系数
$E$	能量 (eV)
$E_c$	导带底 (eV)
$E_v$	价带顶 (eV)
$E_F$	费米能级 (eV)
$E_i$	本征能级 (eV)
$E_g$	禁带宽度 (eV)
$E_{F_n}$	电子准费米能级 (eV)
$E_{F_p}$	空穴准费米能级 (eV)
FF	填充因子
$G$	产生率
$H$	电池厚度 ( $\mu\text{m}$ 或cm)
$H'$	基区厚度 ( $\mu\text{m}$ 或cm)
$\hbar$	普朗克常数 $\hbar = \frac{h}{2\pi} = (6.6 \times 10^{-16} \text{eV} \cdot \text{s})$
$I_0$	反向饱和电流 (mA)
$J$	电流密度 ( $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
$J_{sc}$	短路电流密度 ( $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ )

- $J_1$  光电流密度 ( $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ )  
 $J_m$  最大功率输出点的电流密度 ( $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ )  
 $J_{\text{inj}}$  注入扩散电流密度 ( $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ )  
 $J_r$  空间电荷区的复合电流密度 ( $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ )  
 $J_n$  隧道电流密度 ( $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 或 $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ )  
 $k_i$  辐射损伤系数 (粒子数 $^{-1}$ )  
 $k$  波尔兹曼系数 ( $1.38\times 10^{-23}\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ 或  
 $8.64\times 10^{-5}\text{eV}\cdot\text{K}^{-1}$ )  
 $L_p$  p型材料中, 电子扩散长度 ( $\mu\text{m}$ 或 $\text{cm}$ )  
 $L_n$  n型材料中, 空穴扩散长度 ( $\mu\text{m}$ 或 $\text{cm}$ )  
 $n$  电子浓度 ( $\text{cm}^{-3}$ )  
 $n_i$  本征电子浓度 ( $\text{cm}^{-3}$ )  
 $n_p$  p型材料中的电子浓度 ( $\text{cm}^{-3}$ )  
 $n_0$  热平衡下p型材料的电子浓度 ( $\text{cm}^{-3}$ )  
 $N_A$  受主掺杂浓度 ( $\text{cm}^{-3}$ )  
 $N_c(N_v)$  导带(价带)态密度 ( $\text{cm}^{-3}$ )  
 $N_{\text{ss}}$  界面态密度 ( $\text{cm}^{-2}\cdot\text{eV}^{-1}$ )  
 $P$  功率密度 ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )  
 $P_m$  电池最大功率输出点的功率密度 ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )  
 $P_i$  总的入射功率密度 ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )  
 $P_n$  n型材料中的空穴浓度 ( $\text{cm}^{-3}$ )  
 $P_{n0}$  热平衡下n型材料中的空穴浓度 ( $\text{cm}^{-3}$ )  
 $q$  电子电荷 ( $1.6\times 10^{-19}\text{C}$ )  
 $R_s$  串联电阻 ( $\Omega$ )  
 $R_p$  并联电阻 ( $\Omega$ )  
 $R_c$  欧姆接触电阻 ( $\Omega$ )  
 $s$  表面复合速度 ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )



- $s$ , 电子的表面复合速度 ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
 $s$ , 空穴的表面复合速度 ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
 $T$  透射率或绝对温度  
 $u$  体内复合速度 ( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
 $V_d$  内建电压 (V)  
 $V_m$  电池最大功率点的输出电压 (V)  
 $V_{oc}$  开路电压 (V)  
 $v_{th}$  载流子的平均热运动速度 ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
 $W$  耗尽区宽度 ( $\mu\text{m}$ 或 $\text{cm}$ )  
 $X_j$  结深 ( $\mu\text{m}$ )  
 $\alpha$  光吸收系数 ( $\text{cm}^{-1}$ )  
 $\Delta E_c$  导带不连续值 (eV)  
 $\Delta E_v$  价带不连续值 (eV)  
 $\epsilon_0$  真空电容率 ( $8.85 \times 10^{-14} \text{F}\cdot\text{cm}^{-1}$ )  
 $\eta$  电池效率  
 $\lambda$  光波长 ( $\mu\text{m}$ )  
 $\mu_n$  电子迁移率 ( $\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
 $\rho_s$  薄层电阻率 ( $\Omega/\square$ )  
 $\sigma$  电导率 ( $\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ )或俘获截面积( $\text{cm}^2$ )  
 $\tau$  少子寿命 (s)  
 $\tau_n$  p型材料中的电子寿命 ( $\mu\text{s}$ )  
 $\tau_p$  n型材料中的空穴寿命 ( $\mu\text{s}$ )  
 $\phi$  功函数 (eV)  
 $\chi$  电子亲和势 (eV)

## 内 容 简 介

本书对太阳能电池的工作原理和设计进行了较详细地阐述，并注意把这些原理应用于器件设计。对各种类型的太阳能电池最近的发展动向、水平进行了介绍和评价。此外，对太阳能电池的工艺和性能参数测试等问题进行了适当地讨论。

本书可供从事光电技术和能源开发的技术人员参考或自学，也可供光电技术、固体电子学领域的高年级大学生和研究生作教学参考书使用。

# 目 录

第一章 太阳辐射和器件参数	( 1 )
§ 1.1 太阳辐射	( 1 )
§ 1.2 太阳能电池的历史、现状和将来	( 2 )
§ 1.3 空气质量( <i>air mass</i> )	( 7 )
§ 1.4 器件参数	( 9 )
§ 1.5 太阳能电池的结构	( 11 )
§ 1.6 小结	( 13 )
第二章 光的吸收以及载流子的产生与复合	( 14 )
§ 2.1 光的反射和吸收	( 14 )
§ 2.2 直接跃迁型材料的吸收	( 17 )
§ 2.3 间接跃迁型材料的吸收	( 19 )
§ 2.4 载流子的复合	( 22 )
2.4.1 辐射复合	( 23 )
2.4.2 俄歇复合	( 26 )
2.4.3 间接复合	( 28 )
§ 2.5 表面复合	( 33 )
§ 2.6 小结	( 34 )
第三章 光电流方程和光谱响应	( 36 )
§ 3.1 载流子的扩散和漂移运动	( 36 )
3.1.1 扩散方程和扩散长度	( 36 )
3.1.2 漂移运动	( 38 )
3.1.3 爱因斯坦关系式	( 38 )
§ 3.2 载流子的传输方程	( 39 )

3.2.1	电流密度方程	( 39 )
3.2.2	连续方程	( 40 )
§ 3.3	非平衡载流子的扩散和漂移运动实验	( 41 )
§ 3.4	稳态下的连续方程解	( 44 )
3.4.1	稳态连续方程	( 44 )
3.4.2	半无限吸收模型的稳态连续方程解	( 45 )
3.4.3	吸收发生在三个区的稳态连续方程解	( 50 )
3.4.4	有背表面场结构的稳态连续方程解	( 55 )
§ 3.5	量子效率和光谱响应	( 59 )
3.5.1	光谱响应的表达式	( 59 )
3.5.2	吸收发生在基区的情况	( 60 )
3.5.3	吸收发生在三个区的光谱响应曲线	( 61 )
3.5.4	表面复合速度对光谱响应的影响	( 62 )
§ 3.6	小结	( 64 )
第四章	电池的伏-安特性	( 66 )
§ 4.1	p/n结特性	( 66 )
4.1.1	p/n结的电场和电势分布	( 67 )
4.1.2	结电容	( 71 )
§ 4.2	光电流和暗电流	( 71 )
§ 4.3	准费米能级	( 73 )
§ 4.4	注入扩散电流	( 75 )
§ 4.5	耗尽区中的复合电流	( 80 )
§ 4.6	隧道复合电流	( 84 )
§ 4.7	p/n结反向偏压下的暗电流	( 86 )
4.7.1	体内产生电流	( 87 )
4.7.2	空间电荷区的产生电流	( 88 )
4.7.3	两种产生电流的比较	( 89 )
§ 4.8	总的暗电流	( 90 )
§ 4.9	串、并电阻对 <i>J-V</i> 特性的影响	( 91 )

§ 4.10	金属-半导体(M-S)结构的 $J-V$ 特性	( 95 )
4.10.1	肖特基势垒二极管(SBD)理论	( 96 )
4.10.2	欧姆接触理论	( 101 )
§ 4.11	小结	( 105 )
第五章	电池效率	( 107 )
§ 5.1	效率的理论公式	( 107 )
§ 5.2	器件参数与效率的关系	( 111 )
5.2.1	禁带宽度 $E_g$ 的选择	( 111 )
5.2.2	二极管因子 $A_0$ 和反向饱和电流 $J_0$ 的影响	( 115 )
§ 5.3	串、并电阻的影响	( 117 )
5.3.1	对 $J-V$ 特性的影响	( 117 )
5.3.2	对电池输出功率的影响	( 119 )
5.3.3	对FF和 $\eta$ 的影响	( 119 )
§ 5.4	温度的影响	( 122 )
§ 5.5	欧姆接触电阻的影响	( 124 )
§ 5.6	电池的功率损耗分析	( 126 )
§ 5.7	电池效率的测量	( 127 )
§ 5.8	小结	( 129 )
第六章	电池的设计考虑	( 131 )
§ 6.1	收集几率	( 131 )
§ 6.2	结深、表面复合速度和漂移电场的影响	( 135 )
§ 6.3	电池厚度和背表面电场分析	( 141 )
§ 6.4	顶区的横向电阻	( 144 )
§ 6.5	金属栅设计	( 148 )
§ 6.6	抗反射涂层(ARC)的设计	( 156 )
§ 6.7	衬底材料的掺杂浓度选择	( 163 )
§ 6.8	小结	( 165 )
第七章	硅单晶同质结电池的结构与设计	( 167 )

§ 7.1	引言	(167)
§ 7.2	几种电池结构设计模型	(168)
7.2.1	传统n <sup>+</sup> /p型同质结电池	(168)
7.2.2	高低结发射极p <sup>+</sup> /p/n结(HI.E-p <sup>+</sup> /p/n)	(170)
7.2.3	垂直多结器件	(171)
7.2.4	串列结器件 ( <i>tandem junction</i> )	(174)
7.2.5	锥形表面器件 ( <i>textured surface cell</i> )	(174)
§ 7.3	MINP和PESC的设计模型	(177)
7.3.1	MINP结构分析	(177)
7.3.2	PESC结构	(178)
§ 7.4	聚光系统下电池的设计考虑	(181)
7.4.1	对温度和串联电阻的考虑	(181)
7.4.2	结构考虑	(181)
§ 7.5	空间应用电池的设计考虑	(184)
§ 7.6	Si电池的设计实例	(187)
§ 7.7	成本考虑	(190)
7.7.1	成本估计	(190)
7.7.2	太阳级硅材料	(191)
§ 7.8	小结	(193)
<b>第八章</b>	<b>异质结电池</b>	<b>(195)</b>
§ 8.1	能带结构	(195)
§ 8.2	实际的异质结界面	(199)
§ 8.3	性能估计和设计考虑	(203)
§ 8.4	光谱响应	(206)
§ 8.5	GaAs异质结和异质表面器件	(208)
8.5.1	GaAs材料	(208)
8.5.2	基本结构和设计考虑	(210)
8.5.3	应用于聚光系统的p <sup>+</sup> -Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As/p-GaAs/	

	n-GaAs 电池	( 213 )
8.5.4	在外层空间的应用	( 215 )
§ 8.6	磷化铟(InP) 电池	( 217 )
§ 8.7	CdTe 电池	( 218 )
§ 8.8	小结	( 219 )
<b>第九章</b>	<b>表面势垒器件</b>	( 221 )
§ 9.1	M-S 结构	( 221 )
§ 9.2	MIS 结构	( 226 )
9.2.1	能带结构	( 226 )
9.2.2	设计考虑	( 230 )
9.2.3	栅型设计考虑	( 231 )
§ 9.3	SIS 结构	( 233 )
§ 9.4	光电化学(PEC) 电池	( 235 )
§ 9.5	小结	( 238 )
<b>第十章</b>	<b>全薄膜电池的设计与结构</b>	( 239 )
§ 10.1	多晶电池的设计考虑	( 239 )
10.1.1	光学特性	( 239 )
10.1.2	能带结构	( 240 )
10.1.3	几何结构	( 242 )
10.1.4	晶粒大小与晶粒边界对收集几率的影响	( 242 )
10.1.5	晶粒取向的影响	( 244 )
§ 10.2	薄膜生长	( 246 )
10.2.1	成核和长大	( 246 )
10.2.2	增大颗粒的方法	( 246 )
10.2.3	重结晶	( 249 )
§ 10.3	晶粒大小对电池效率的影响	( 249 )
§ 10.4	薄膜 GaAs-p <sup>+</sup> /n/n <sup>+</sup> 结构	( 252 )
§ 10.5	Cu <sub>2</sub> S/CdS 全薄膜器件的结构与性能	( 253 )

10.5.1	器件结构和制造	( 253 )
10.5.2	光伏过程和效率	( 255 )
10.5.3	Cu <sub>2</sub> S/CdS膜的性质和厚度选择	( 257 )
§ 10.6	CdTe为基的个薄膜电池	( 258 )
§ 10.7	非晶硅薄膜(c-Si:H)器件	( 260 )
10.7.1	非晶半导体结构模型	( 261 )
10.7.2	c-Si:H的光电特性	( 263 )
10.7.3	器件结构	( 265 )
§ 10.8	小结	( 267 )
参考文献		( 270 )



# 第一章 太阳辐射和器件参数

## § 1.1 太阳辐射

太阳是一个由气体组成的大火球。在它的中心不断进行着由氢演变成氦的核聚变反应，温度高达两千万度。太阳的表面是由气体组成的光球层，在光球层和核聚变区之间有一个负氢离子层，这个离子层吸收了来自太阳中心的大部分强辐射。负氢离子层吸收辐射而积累起来的热通过对流传递给光球层，使光球层的温度保持在6050K左右。由此可见，来自太阳的辐射，不是取决于太阳中心热核反应区的温度，而是由太阳表面光球层的温度所决定。

太阳表面的辐射非常近似于太阳表面温度下的黑体辐射，两者的光谱分布如图1.1所示。

地球上的一切能量都来源于太阳，这不仅因为地球是太阳的一个分离体，而且更因为太阳源源不断地通过光辐射给地球输送能量。人类目前的主要能源如石油、煤、天然气、水力、风力和潮汐等，都是太阳能的不同转换形式。太阳表面总的辐射功率为 $3.8 \times 10^{26} \text{ kW}$ ，射向地球的只占20亿分之一，除去地球大气层反射回宇宙的部分外，实际到达地面的大约只有70%，此值为人类目前所消耗的总功率的三万多倍。因此，只要开发和利用射向地球的太阳能的很小一部分，人类就可得到取之不尽、用之不竭的能源。