

德国半导体应用经典教材

太阳能光伏技术(第2版)

Photovoltaik

Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften,
Solarzellenkonzepte und Aufgaben

2. Auflage

[德] 汉斯-京特·瓦格曼 著
海因茨·艾施里希
叶开恒 译
李裕华 审校

Hans-Günther Wagemann
Heinz Eschrich



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

德国半导体应用经典教材

Photovoltaik

Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften,
Solarzellenkonzepte und Aufgaben
2. Auflage

太阳能光伏技术

(第2版)

〔德〕 汉斯-京特·瓦格曼
Hans-Gunther Wagemann 著
海因茨·艾施里希
Heinz Eschrich

叶开恒 译
李裕华 审校



西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

译者前言

自工业革命以来,以煤炭、石油和天然气为代表的化石能源开始在世界能源供应中占据主导地位。然而化石能源在使用过程中的排放气体对环境污染严重,并且储量有限,这些缺点促使人们开始将目光转向可再生能源。以太阳能、风能和生物燃料为代表的可再生能源对环境的影响小、能量供应充足,基于可再生能源的能量转换与存储技术是新能源的最主要发展方向。在可预见的未来,以可再生能源为代表的新能源将在全球能源消费中占据重要份额。

德国十分注重发展可再生能源开发,其可再生能源政策与技术研究目前在全世界处于领跑者位置。2004年德国颁布了新版《可再生能源法》,其中规定国家对可再生能源发电进行补助。此政策极大地促进了可再生能源在德国的开发与利用,德国也因此成为了全球最大的光伏设备消费市场。2011年3月日本福岛核电站核泄露事故之后,在民众的强烈呼声下,德国政府迅速调整了能源政策,计划在2022年之前逐步关闭德国境内所有17座核电站。目前,德国核电在其发电总量中所占比重约为四分之一,关闭核电站后的能源缺口将由可再生能源填补。

德国地处北半球高纬度地区,太阳光照的地理位置并不十分理想,但是在国家政策的引导和支持下,从事光伏技术研究的科研院所和企业却很多,并且兴建了多座太阳能光伏电站。同时,德国政府通过在民间推广“十万太阳能屋顶”^①等一系列项目,鼓励并促进太阳能光伏发电技

① 德国自1999年开始施行的一项计划,通过向家庭和中小企业提供低息贷款,鼓励在建筑物屋顶安装太阳能光伏发电设备。至2003年底项目结束,贷款超过10亿欧元,私人装机总量超过300 MW。

术的应用。其最终目的是推动并带领全球新能源技术使用。在德国的带动下,一些欧洲国家(如法国、意大利、西班牙等)以及美国、印度等国也出台了相应的新能源政策,鼓励发展其各自的可再生能源项目工程。

中国目前是硅太阳能电池的最大生产国,2010年产量占全球总产量的48%。利用我国生产原料和人力成本的优势,可极大减少太阳能电池的生产成本,从而降低光伏发电价格,由此进一步推动太阳能光伏的应用。此外,我国新疆、内蒙古、西藏以及东北、华北广大地区全年日照充足,是应用光伏发电的理想地区。中国于2005年同样制定出台了《可再生能源法》,旨在鼓励并推广可再生能源。作为世界第一大能源消耗国和温室气体排放国,中国的可再生能源政策和技术推广对于建立可持续发展战略有着重要意义。

我国得益于地理位置优越、原材料和劳动力价格低的优势,光伏产业发展势头迅猛,是目前少数几个可与欧美发达国家齐头并进的产业。但是,良好发展前景下也有隐患:我国光伏领域的科技水平不高,生产太阳能电池的重要专利技术多由发达国家垄断,光伏企业的生产、检测设备主要依赖进口;我国虽然是太阳能电池的生产大国(约占全球总产量一半),但是绝大多数产品用于出口(高于90%),国内市场规模小。

随着近年来国内一系列大型光伏电厂项目工程的实施和光伏并网电价补助政策的出台,国内市场对太阳能光伏发电设备的需求在稳步上升。更重要的是如何提升光伏产业的技术研究,通过科技创新使我国的光伏产业更具竞争力,实现在目前生产加工基础之上的产业升级。

德国利用基础物理研究的深厚功底,并发挥其传统的化工和机械制造业优势,因而在太阳能电池结构设计、生产工艺和自动化设备研发领域领先全球。本书深入浅出地详细地讲解了各种材料的太阳能电池原理,并简要介绍了目前主流生产工艺,是一本传授太阳能光伏技术入门知识的优秀教材。译者翻译本书的主要目的,是向国内读者介绍德国先进的光伏理论技术,以及光伏研究和光伏专业课程教材。

本书翻译的是原书第2版,由Springer出版集团旗下的Vieweg+Teubner出版公司于2010年出版。《太阳能光伏技术》先是由柏林工业大学作为本校讲义使用,内容经过不断修改补充,广受学生欢迎。作为教材正式出版后,作者仍根据太阳能光伏技术的最新进展,不断补充、修订、完善。原书主编汉斯-京特·瓦格曼教授(Prof. Dr.-Ing Hans-Günther Wagemann)自1977年任职于德国柏林工业大学电子与信息技

术学院的半导体技术研究所,长期从事授课与科研工作,曾于1992年作为创始人之一,建立了柏林—勃兰登堡科学院。瓦格曼教授在柏林工业大学主持科研工作期间的主要研究方向是硅材料太阳能电池器件工艺、分析与模拟,硅材料光学特性研究,以及MOS器件性能研究。

在本书翻译过程中,瓦格曼教授给予译者热情的支持,并专门为中文版写了序,译者表示衷心地感谢。译者还要由衷地感谢德国斯图加特大学埃里希·卡斯帕教授(Prof. Dr. Phil. Erich Kasper)在专业理论方面进行的认真细致辅导。西安交通大学城市学院李裕华教授对译稿进行了认真审校并提出具体修改意见,改善了译文质量,译者向他表示诚挚的感谢。冯楚焜同学以优雅细腻的文笔,完美诠释了德国诗人保罗·杰哈特的诗句,译者向她表达最真诚的谢意。西安交通大学出版社赵丽平老师、贺峰涛老师和其他老师在本书出版过程中付出了辛勤的劳动,译者借此机会向各位老师致谢。最后感谢我的父母,谢谢你们对我始终如一的支持和理解,让这一切最终得以实现。

译者自知才学浅薄,对于书中存在的各种错误还请读者们不吝赐教,一一指正。

叶开恒

ye_kh@163.com

2011.08 于德国斯图加特

目 录

译者前言

中文版前言

符号表

第 1 章 前言	(1)
1.1 光伏的历史发展	(3)
第 2 章 太阳辐射——光伏能源	(7)
2.1 辐射源太阳与辐射接收者地球	(7)
2.2 太阳——黑体辐射	(9)
2.3 地球日照辐射的功率与光谱分布	(11)
第 3 章 用于光伏能量转换的半导体材料	(17)
3.1 固体吸收电磁辐射	(17)
3.2 光伏极限转换效率	(19)
3.3 辐射吸收导致载流子生成	(22)
3.4 太阳电池的半导体技术基础	(25)
3.5 匀质半导体材料中的剩余载流子特征	(27)
3.6 分离激发剩余载流子的方法	(31)
3.7 反射损失	(34)
第 4 章 太阳电池的晶态半导体材料基础	(36)
4.1 太阳电池中的半导体二极管	(36)
4.2 晶体太阳电池的基本模型	(38)
4.2.1 电子电流	(40)
4.2.2 空穴电流	(41)
4.2.3 总电流	(42)
4.2.4 光谱灵敏度	(44)

4.3	标准光谱照射	(45)
4.4	太阳电池的技术参数	(46)
4.5	晶体太阳电池的等效电路图	(48)
4.6	硅二极管太阳电池的极限转换效率	(49)
第 5 章	单晶硅太阳电池	(52)
5.1	关于光谱灵敏度的讨论	(52)
5.2	发电特性的温度特性	(62)
5.3	改进型单晶硅太阳电池的参数	(64)
5.4	晶体培育	(65)
5.5	制备	(66)
5.6	高功率太阳电池	(69)
5.7	航天应用中的太阳电池特性退化现象(即辐射损伤)	(72)
第 6 章	多晶硅太阳电池	(76)
6.1	SGS 太阳能级硅生产原料的制备	(76)
6.2	新型硅精炼工艺	(80)
6.3	多晶硅模块铸造法	(83)
6.4	多晶硅中的晶界模型	(86)
6.4.1	光谱剩余载流子密度的计算	(88)
6.4.2	单一微晶体中光电流密度的二维边界值问题	(90)
6.5	光谱灵敏度与光电流密度的计算	(93)
6.6	制备	(96)
第 7 章	化合物半导体太阳电池	(100)
7.1	太阳电池材料硅和砷化镓的对比	(100)
7.2	具有 AlGaAs 窗口层的 GaAs 太阳电池	(101)
7.3	AlGaAs/GaAs 太阳电池的模型计算	(102)
7.4	晶体培育	(107)
7.5	GaAs 太阳电池的液相外延生长	(109)
7.6	制备 GaAs 太阳电池的 LPE 工艺流程	(110)
7.7	用于制备薄膜结构的 III/V 族半导体气相外延技术	(111)
7.8	III/V 族半导体材料的叠层结构太阳电池	(112)
7.9	III/V 族化合物半导体太阳电池的聚光技术	(115)
第 8 章	非晶硅薄膜太阳电池	(119)
8.1	非晶硅特性	(119)
8.2	非晶硅的掺杂	(122)

8.3	a-Si : H 太阳电池的物理模型	(125)
8.3.1	暗电流	(126)
8.3.2	光电流	(128)
8.4	制备	(133)
8.5	如何减小光退化效应	(137)
8.6	a-Si : H 太阳电池的生产制备	(137)
第 9 章	其他类型太阳电池	(140)
9.1	晶体硅双面光敏 MIS 太阳电池	(140)
9.2	铜铟双硒太阳电池	(140)
9.3	a-Si : H/c-Si 太阳电池	(142)
9.4	球型太阳电池	(143)
9.5	有机半导体太阳电池	(145)
9.5.1	有机分子半导体	(145)
9.5.2	有机材料太阳电池	(147)
9.5.3	染料太阳电池	(149)
9.6	第三代太阳电池	(150)
第 10 章	展望	(153)
附录 A	计算与表格	(155)
A.1	计算极限转换率的积分解法	(155)
A.2	扩散方程的求解	(156)
A.3	标准光谱 AM1.5	(159)
A.4	$T=300\text{ K}$ 下的硅材料吸收系数	(160)
附录 B: 习题		(161)
习题 2.1	欧洲不同地点的 AM 值	(161)
习题 2.2	估算太阳常数 E_0	(162)
习题 2.3	估算柏林地区的 AM(1.5) 值	(164)
习题 2.4	太阳日常轨道以及柏林地区所处黄道面上接受的太阳辐射强度 和太阳能量的日均及年均量	(165)
习题 3.1	丹伯太阳电池	(169)
习题 3.2	载流子扩散微分方程的二维数值解	(172)
习题 3.3	在阳光照射条件下, 尺寸为 $B \times H$ 的 p 型硅片内的电子分布 $\Delta n(x, y)$ 偏微分方程的解析解	(176)
习题 5.1	硅太阳电池分析	(177)
习题 5.01	发电特性曲线测量	(178)

习题 5.02	光谱灵敏度测量	(180)
习题 5.03	测量太阳电池的空间电荷区电容	(182)
习题 5.04	利用两种不同照射强度 E_1 和 E_2 下测得的短路电流 $I_{ph}(E)$ 和开路电压 $U_L(E)$ 确定二极管反向饱和电流 I_0	(185)
习题 5.05	根据先前确定的反向饱和电流 I_0 曲线上开路点 $U_L=U(I=0)$ 的斜率计算寄生串联电阻 R_s	(186)
习题 5.06	根据先前确定的 R_s , 通过反向饱和电流 I_0 曲线上短路点 $I_K=I(U=0)$ 的斜率计算寄生并联电阻 R_p	(187)
习题 5.07	计算基底和发射极内的载流子扩散系数	(188)
习题 5.08	基底内少数载流子的扩散长度	(188)
习题 5.09	计算较高掺杂区中的扩散长度	(189)
习题 5.10	外量子效率 $Q_{ext}(\lambda)$ 的测量与模拟	(190)
习题 5.11	使用半导体参数模拟发电特性曲线 $I(U)$	(192)
习题 7.1	六层太阳电池的极限转换率	(197)
附录 C	实践练习	(200)
C1	柏林工业大学的硅太阳电池简易工艺	(200)
C2	利用简易材料制作染料太阳电池	(203)
参考文献		(205)
索引		(210)

向日金鳞开
 愉悦满心怀
 众生有樊篱
 昭辉逾荆棘
 柔光思怡然。
 怜吾残躯首
 卧榻时已久
 今日能复立
 喜而得生机
 望空解愁颜。

保罗·杰哈特^② 1666

第 1 章

前 言

太阳能是世界上唯一取之不尽的能源。每天地球所接受的太阳电磁辐射能量是人类对一次能源需求的上千倍。除了转换成为低品位的热能以外,太阳辐射还能够地球上通过植物光合作用转换成为生物化学能;而人们也可以利用光伏技术将太阳能直接转换为电能,从而获得高品位能源。

在德国,这种新型能源转换技术受益于国家补助,已经开始在社会生活中广泛采用。相比于诸如涡轮机燃烧室中的巨大能量流,尽管太阳辐射能在地表处的能量密度很低,但是已经有越来越多的人将目光聚集到这种可再生能源技术。光伏发电在德国发电总量中只占 0.6%(2008 年),其与水能、风能、太阳热电能和生物

①此数字为原书页码,书末索引条目中的页码项指向此处。

②保罗·杰哈特(Paul Gerhardt 1607-1676)德国宗教诗人。

能一样,都只占有很小份额;但是光伏发电的年增速达到了惊人的 25%。光伏技术不会排挤其他能源,它的主要作用是促进未来能源结构的多样化。2008 年全球太阳能电池板产量为 7.9 GW。德国在 2007 年太阳能电池的总装机容量为 3.8 GW,这些设备转换的太阳能总量为 3000 GWh。德国联邦议会通过的《可再生能源法》(EEG2004)中规定了光伏发电设备的使用者可以向公共电网出售电能获得收益。

- 2 而不断增加中的私人光伏发电设备在并入公共电网之后促进了能源供应的分散化进程,能源经济结构也将随之全面调整。但是,太阳能电池及其产生的电能价格持续居高不下,目前在经济性上还无法与其他能源技术(同样获得多种补助)竞争。未来德国国内建设的大型光伏工程项目将不断增加,这些项目的建设有助于降低太阳能电池和光伏电能的价格。

德国通过国家补助(每年来自于联邦政府与欧盟的资金共约 4 亿欧元)建立了一整套科研生产体系,并于 2009 年在勃兰登堡州利博豪斯建造了一座功率为 53 MW 的试验性太阳能电厂。在德国政府“十万太阳能屋顶”计划的鼓励下,许多地区的民房都安装了可以并网的千瓦级太阳能发电系统。德国也因此成为全世界利用太阳能技术发电最广泛的国家之一。太阳能电池和光伏发电设备在世界市场上日益受到欢迎,沙漠地区的人畜用水会因为缺少光伏发电技术的支持而变得无法想象。光伏设备的研究与生产无疑将持续下去,在未来第一批传统火力发电厂被光伏发电厂取代之前还有许多工作需要完成。

本教材的对象是主修物理专业和电子电气技术专业的学生,以及有元器件经验的工程师,本书的目的是引导这样的读者群进入这个有意义的光伏技术领域,传授给他们可靠的半导体设计技术,使他们能正确地生产和处理作为光伏元器件的太阳能电池。本书与 1994 年的第一版相比,增加了相关篇幅介绍近年来的科学新知识与技术新进展。除此之外还新增加了 20 道习题(附带答案),通过这些习题分析了太阳能电池(小面积)的各项性能指标。本书的最后部分(附录 C)提供了两个实习应用实例作为全书整体内容的延伸。其中实习例一(C1)涵盖了光伏科技基础,可以在大学展开,使学生分组自行制作硅晶太阳能电池;实习例二(C2)的适用者为中小学生,目的在于利用简单材料初步研究染料太阳能电池的能量转换过程。

全书内容曾作为柏林工业大学电子与信息技术学院(Fakultät Elektrotechnik und Informatik der Technischen Universität Berlin)的授课教材,由两位作者共同编写。教材写作期间作者不断被学生们的热情协助所鼓舞。作者在这里感谢 Dr.-Ing. D. Lin 先生和 Dipl.-Ing. M. Rochel 先生的大力协助,感谢 Dipl.-Ing. S. Peters 先生, Dipl.-Phys. P. Sadewater 先生和 Dipl.-Ing. R. Hesse 先生在研究所中的学生指导工作,以及他们与 M. Mahnkopf 女士、A. Eckert 先生和 Dipl.-Ing. H. Wegner 先生一起对全书写作的启发。感谢 Dr. T. Eickelkamp 先生和 Dr. S. Gall 先生在他们学习期间对习题(第 5 章习题)的细致修改工作。感谢汉

诺威大学(Universität Hannover)Dr. -Ing. D. Mewes 教授对第 6 章 6.1 节的内容指导。埃森市(Essen)Waldorf 中学的 Dipl. -Ing. J. Wagemann 先生和他的学生 3 们全心投入,利用最简单材料制作出了染料太阳电池(附录 C2)。Dipl. -Ing. P. Scholz 先生为全书制定提纲并且为其润色。感谢 Vieweg + Teubner 出版社的 Dipl. -Phys. U. Sandten 先生、K. Hoffmann 女士和 C. Agel 女士对原稿撰写的专业指导。

1.1 光伏的历史发展

光伏能源转换的历史与现代自然科学发展进程有着紧密的联系。物质与光究竟如何相互作用影响,这个问题从一开始就确立了在所有研究中的中心地位。由马克斯·普朗克于 1900 年建立的黑体辐射定理奠定了现代物理学基础,定理中第一次解释了电磁波辐射与吸收过程中光波能量与波长之间的关系^[Pla00]。

从某种程度上我们应该感谢中世纪炼金师对“智慧石”的不断探寻,当时有人相信任何物质与这种神奇的石头接触后都能变成黄金。他们发现某些物质,例如硫化钙与重晶石经过阳光照射后会在暗处发光。作家歌德也提到过 1805 年他在意大利旅行时参观了位于博洛尼亚附近的一处采石场,并且从那里捡了一袋“会发光的石头”带回魏玛^[Goe86]。

感谢亚历山大-埃德蒙·贝克勒尔(Alexandre Edmond Becquerel)(1820—1891)在巴黎所做的关于光对物质影响的首次科学探索^[Bec39]。他研究了光对电解液中的金属盐和金属电极的作用,并且得出结论:硒的导电性会通过光照而改变,而并非是预想中的铜。工业家西门子利用这个结论于 1875 年制作出了测光仪^[Sie75]。

光伏太阳电池(也就是在阳光照射下输出电能的器件的真正实现)的出现则是在二极管发明之后。第一支二极管早在 1874 年由 Ferdinand Braun 发明^[Bra74],并且稍后作为电子检波器取代金属屑检波器应用于电报机中。此后,直到 1938 年才由肖特基第一次解释了金属半导体接触面附近的“阻挡层”(我们今天称之为“耗尽层”),并且根据其特性建立了二极管特性曲线^[Sch38]。1948 年美国贝尔实验室的 R. S. Ohl 为一种光敏硅器件申请了专利^[Ohl48],这种器件由沿垂直于微晶体优先生长方向切割开的硅片构成,并用铂作为接触金属。今天人们把这种金属半导体二极管称为“肖特基二极管”。当时对肖特基二极管在阳光照射下的光谱灵敏度测量显示,它的最大吸收值大致位于硅能带边缘。但是,有效光电转换却由于硅晶体的高密度掺杂而变得不可行。

1948 年美国陆军的 K. Lehovec(Fort Monmouth, USA)提出了关于使用高 4 纯度材料金属半导体二极管作为光伏能源转换的完整概念。稍后的 1949 年肖特

基于贝尔实验室宣布发明了一种半导体-半导体二极管。这种二极管基于锗,并且在锗基底的两个相邻区域不同掺杂,使其分别带有“正(positive)”、“负(negative)”载流子,这种结构也因此被称为“pn结”^[Sho49]。pn结的耗尽层位于器件内部,可以有效地改善纯硅材料的太阳电池特性。1954年贝尔实验室的研究人员 D. M. Chapin, C. S. Fuller 和 P. L. Pearson 共同展示了第一种实用型太阳电池^[Cha54]。发明者们认识到了这种器件对太阳光光谱具有很好的适应性,但发明者们也为期待利用这种新型“太阳能器件”解决世界能源问题的过高期望泼了冷水。同年(1954)美国赖特-帕特森空军基地(Wright Patterson Center Ohio)的 D. C. Reynolds, G. Leies 与 R. E. Marburger 共同发明了简易硫化镉太阳电池。一年之后(1955)德国爱尔兰根西门子实验室的 R. Gremmelmeier 发明了第一种砷化镓太阳电池^[Gre55]。随着 1960/61 年 M. Wolf^[Wol66] 以及 W. Shockley 与 H. J. Queisser^[Sho61] 的关于不同材料太阳电池极限转换率论文的发表,光伏技术的发展渡过了起始阶段。人们认识到了晶体硅在太阳光谱中的优异性能,并且提出了最大光电转换效率“Shockley-Queisser 极限”为 $\eta=44\%$ 。

第一种投入工业生产的太阳电池使用的是半导体硅。太阳电池在当时的一项重要应用是为太空卫星提供动力。太阳能发电板的好处在于,其可以抵御赤道上空 36000 公里高度上地球同步轨道空间的宇宙辐射,并且自身重量很轻,适于安装在卫星上。J. J. Wysocki 和他的同事早在 1966 年就研制出了“抗辐射”型硅太阳电池^[Wys66]。但是当时的单晶硅提纯方法与面板生产工艺成本过高,导致太阳能发电板价格高居不下,限制了其在空间领域中的应用。

20 世纪 70 年代初的能源危机促进了太阳电池技术向地面应用转化。降低工业生产需求驱使科研人员转而寻求新材料和新技术。1974 年 W. E. Spear 和 P. G. Lecomber 发现,利用气体放电使硅与氢原子相结合而制成的硅氢化合物非晶硅薄膜材料能使半导体的掺杂效果增强^[Spe75]。这种缩写为 a-Si:H 的氢化非晶硅材料可以作为薄膜层($< 1\ \mu\text{m}$)覆盖在透明载体上。1976 年 D. E. Carlson 和 C. R. Wronsky(RCA 普林斯顿)利用这种材料制成了非晶硅薄膜太阳电池。这种太阳电池采用了栅电极结构,工作转换率 $\eta=8\%$ ^[Car76]。当时工业界对这种在玻璃板面上采用廉价表层镀膜技术制造的半透明太阳电池寄予了很大的期望。但是,硅氢化合物太阳电池的发电功率会在阳光持续照射下降低。研究后发现非晶态材料吸收阳光后会释放原先结合在内部的氢原子,导致材料内部的共价键非饱和,并且形成复合中心(Staebler-Wronski 作用)^[Sta77]。这个问题至今还没有找到令人满意的解决方法。

目前最重要的经济性太阳电池生产工艺是直拉制硅法。利用直拉法可以生产出大尺寸硅棒(目前最大超过 300 kg),从中人们获得可用于太阳电池的大面积硅晶圆片。但是硅晶体在凝结过程中会受到杂质析出与微晶排列的影响。直拉制硅

法在 1977 年由 B. Authier 与 Wacker Brughausen 提出^[Aut77], 同年 H. Fischer 与 W. Pschunder (Telefonken 公司, Heilbronn) 提出了利用多晶硅材料制造太阳能电池^[Fis77]。这种微晶硅太阳能电池的转换效率可以达到 $\eta = 17\%$ ($15 \times 15 \text{ cm}^2$), 是目前各种尺寸光伏发电装置的标准组件。在光伏材料研究取得进展的同时, 硅芯片集成电路的生产工艺也在逐渐“瘦身”, 使得硅太阳能电池的大规模流水线生产成为可能^[Gre01]。除了日本 Sharp 公司和美国 Spectrolab 公司外, 德国的 Q-Cells 和 Sun World 公司也都具备了硅太阳能电池的大规模产能。在硅材料太阳能电池发展的同时, 各种基于其他新型材料的光伏设备也在发展, 这些新技术在保持能量转换效率的同时, 可以进一步降低光伏发电成本。

现在已经出现了 MIS 太阳能电池 (MIS, metal insulator semiconductor)。MIS 器件结构中的耗尽层位于因含有铯离子从而带电的栅极电介质层以下, 并通过低温下硅基底表面的反型转换而形成^[She74]。此外, 新型器件中还包括了球型硅太阳能电池, 这种器件由具有 pn 结表层结构的微小硅球 (直径小于 1 mm) 经过打磨后覆盖在铝箔阵列上构成^[Lev91]。利用 EFG 工艺生产的硅八面中空管可以有效降低硅面板的切割损失^[Lau00]。而硅太阳能电池以外的最佳选择, 无疑是在 II/VI 族化合物半导体材料硫化镉太阳能电池基础上发展出的无镉环保型 CIGS 太阳能电池。最后还有有机半导体太阳能电池, 例如无需纯净室技术就可以生产的由并五苯 (五环芳香烃) 与噻吩等烃原子构成的 BHJ 太阳能电池。另外, 有机半导体材料还包括了 1991 年由 M. Graetzel 及其同事发明的染料太阳能电池^[Vla91], 这项电化学突破也是目前研究光合作用实用化的重要进展。染料太阳能电池的工作原理是, 利用电解质在光照下电解产生氢离子和电子形成电流, 电解产生的电子-空穴复合率被添加物所抑制, 直至通过外接负载做功后回流最后在复合电极实现复合。

2003 年 M. A. Green 提出了一种新概念太阳能电池: 第三代太阳能电池^[Gre03, Wür03]。6 前两代太阳能电池 (第一代: 由晶体硅及其他半导体单一材料制成的太阳能电池; 第二代: 覆盖于廉价载体的氢化非晶硅与二六族半导体薄膜太阳能电池) 都由同质半导体材料构成, Green 提出未来发展多层混合异质结构可以充分利用太阳能转换中的介观效应。例如通过多层结构对太阳光谱中不同能量光子进行多层转换, 吸收效果明显优于受“Shockley-Queisser 极限”限制的单层结构太阳能电池。多层太阳能电池对太阳频谱的吸收更加有效。另外, 碰撞电离是实现高转换率的又一种方法。除光伏转换之外, 热吸收也是太阳能应用的重要实现方法, 热动力转换的理论转换效率为 95%, 科研人员希望在未来研制出的光伏器件能够更加接近这一目标。

应用于航空技术的 III/V 族化合物太阳能电池也在近年来取得了长足发展: 具有聚光结构的多层薄膜太阳能电池可以充分整体利用太阳光谱。由 GaAs/GaSb 材料制成的第一种多层薄膜太阳能电池, 在聚光照射下的转换率已经达到了 $\eta = 35\%$ ^[Fra90]。目前造价高昂的三层与四层结构太阳能电池, 在标准照射强度下的转换

率为 $\eta=30\%\sim 32\%$ 。这种器件虽然昂贵,但其转换率更高,光吸收更加有效,并且重量轻^[Kin04]。

如何评价生产太阳电池过程中产生的能耗,已经在器件实用化中变得愈发重要。光伏转换是对可再生能源的直接物理转换过程,然而光伏电池生产技术复杂且耗能严重。目前一种新概念:“回收时间(Erntezeit)”或“回收因子(Erntefaktor)”开始被引入,用于判断太阳电池的持久性。这种概念描述了太阳电池需要工作多久才能回收制造过程中所消耗的能量。以工业化生产的多晶硅太阳电池为例(2005年市场占有率为60%),它的回收时间在过去的十年里已经降至3年。也就是说,这种太阳电池需要运转3年时间,才能产生与制造过程中能耗相同的电力。而其自身工作寿命为15~20年。这样它的回收因子为 $(15\sim 20)\text{年}/3\text{年}>5\sim 7$ 。

更详细的太阳电池发展史在 J. J. Loferski 的文章^[Lo93]中可以找到。关于晶体硅太阳电池的详细描述可以查阅 M. A. Green 所著的相关资料^[Gre01]。

第 2 章

太阳辐射——光伏能源

为了有效利用光伏能量转换,有必要了解能量来源的详细知识。光伏太阳能电池作为能量接收装置,必须适应太阳光源的特征光谱。因此,我们首先研究太阳辐射的物理模型,以及地球大气对太阳光光谱结构的作用和影响。

2.1 辐射源太阳与辐射接收者地球

太阳内部不断进行着热核聚变反应,温度极高($T=15.6\times10^6\text{ K}$);而宇宙空间的温度极低,空间背景辐射只有 $T=2.73\text{ K}$ 。这两种温度极端在太阳表面处(光球,即太阳的视觉表面)达到平衡,这里的温度为 $T_s\approx5800\text{ K}$ 。太阳光球上的所有元素都以原子的形态存在,整体全部电离。这种元素形态特征导致了太阳光谱具有密度极高的相邻吸收谱线。因此,气态的太阳表层可被近似视为吸收系数为 $A=1$ 的黑体辐射源。

地球表面的平均温度基本保持不变,因此可以认为在太阳表层与地球轨道之间的距离上,太阳作为黑体辐射源与地球保持辐射平衡。地球所接收到的辐射功率可以通过斯蒂凡-玻耳兹曼定理求得(式 2.1)。

太阳与地球的中心平均距离(此处采用地球椭圆轨道的平均距离)为 $r_{SE}=1.496\times10^{11}\text{ m}$ 。由于地球轨道的离心率很小,只有 $\epsilon=0.017$,所以可以将其近似为圆周处理。太阳半径为 $r_s=0.696\times10^9\text{ m}$,地球半径是 $r_E=6.38\times10^6\text{ m}$ 。

在光伏工程中,人们将太阳半径 r_s 与太阳到地球的中心平均距离 r_{SE} 之比的平方值定义为地球轨道的太阳辐射衰减因子或者稀释因子 f (见式 2.1)。衰减因子 f 出现在依据斯蒂凡-玻耳兹曼定理确定的辐射功率 P_s 的表达式中,在这里 P_s 定义为太阳辐射至地球投影圆面积 $r_E^2\cdot\pi$ 上的功率值,表达式中的 σ 为斯蒂凡-玻耳

兹曼常数。

$$P_s = \pi r_E^2 f \cdot \sigma T_s^4, \text{ 其中 } f = \left(\frac{r_E}{r_{SE}} \right)^2 = 21.7 \times 10^{-6}; \text{ 并且 } \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \quad (2.1)$$

8

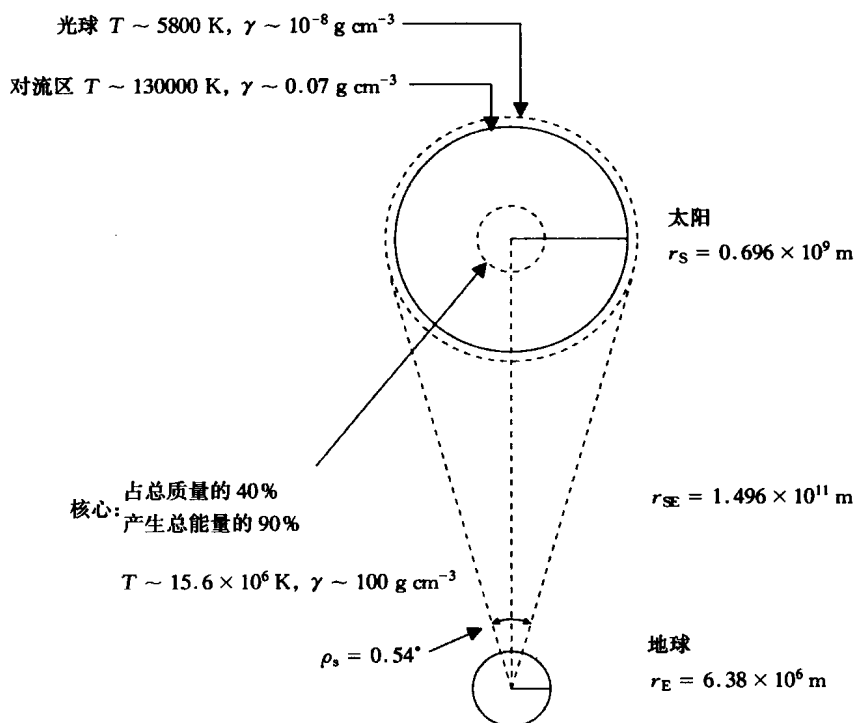


图 2.1 宇宙空间中的太阳和地球^[Geo05]

人们通过地球大气层外(大气层顶部)的辐射功率密度确定了平均太阳常数 E_s (计算时考虑到了轨道离心率和太阳黑子波动)。世界气象组织 1982 年在日内瓦公布的第 590 号文献中确定太阳常数值为

$$E_s = (136.7 \pm 0.7) \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2} \quad (2.2)$$

根据式(2.1)可以计算出照射在地球大气层顶的辐射功率为 $P_s = 1.776 \times 10^{17} \text{ W}$, 并且可进一步得出地球全年接收的辐射能量为 $W_s = 1.56 \times 10^{18} \text{ kWh}$ (对比: 2004 年全球一次能源需求为 $125 \times 10^{12} \text{ kWh}$, 德国为 $4.0 \times 10^{12} \text{ kWh}$)