



“十二五”国家重点图书出版规划项目  
陕西出版资金资助项目

新兴微纳电子技术丛书

# 半导体光伏器件

*Semiconductor Photovoltaic Cells*

张春福 张进成 编著 ●  
马晓华 冯倩

 西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

西安电子科技大学

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
陕西出版资金资助项目

新兴微纳电子技术丛书

# 半导体光伏器件

Semiconductor Photovoltaic Cells

张春福 张进成  
马晓华 冯 倩

编著



西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

随着对能源需求的不断增加以及对生存环境的不断重视,人们逐渐将目光转向储量极其丰富而又清洁无污染的太阳能,半导体光伏器件因而越来越为人们所重视。本书讲述了半导体光伏器件的基本工作原理,论述了主流的硅基、Ⅲ-V族化合物以及传统薄膜太阳能电池,介绍了新近迅速发展的染料敏化太阳能电池和有机太阳能电池,最后对超越现有极限、获得高效太阳能电池的一些新思路、新方法做了总结。

本书可作为半导体专业高年级本科生以及研究生的教材,对从事半导体光伏太阳能器件研究的科研人员和工程师也有重要的参考价值,材料、能源、信息等领域的科技人员以及对半导体光伏器件感兴趣的其他相关人员也可从本书中学到相关知识。

### 图书在版编目(CIP)数据

半导体光伏器件/张春福等编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2015.4

(新兴微纳电子技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3537 - 8

I. ①半… II. ①张… III. ①太阳能电池—研究 IV. ①TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 052275 号

策 划 李惠萍

责任编辑 雷鸿俊 李惠萍

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2015年4月第1版 2015年4月第1次印刷

开 本 787毫米×960毫米 1/16 印 张 23.75

字 数 476千字

印 数 1~3000册

定 价 46.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3537 - 8/TM

**XDUP 3829001 - 1**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
陕西出版资金资助项目

## 新兴微纳电子技术丛书

### 编写委员会名单

编委会主任 庄奕琪

编委会成员 樊晓桢 梁继民 田文超 胡 英 杨 刚

张春福 张进成 马晓华 郭金刚 靳 钊

娄利飞 何 亮 张茂林 冯 倩

# 前 言

随着社会的不断发展，人们消费的能源越来越多。在各种能源形式中，电能无疑是用处最为广泛的能源，它几乎应用于人类生活的各个方面。随着人们对环境保护的不断重视，如何利用清洁无污染的方法获得电能成为当今社会的重要课题。

与煤、石油、天然气等储量有限且不可再生资源不同，太阳能取之不尽，用之不竭，清洁无污染，是理想的能源来源。随着太阳能光伏器件的出现，人类获得了一种直接从太阳能产生高质量能源的方法。近年来，半导体太阳能光伏器件已应用于从太阳能电站到路灯光伏照明系统等许多方面，未来半导体太阳能光伏器件将扮演着越来越重要的角色。

半导体太阳能光伏器件种类繁多，本书对最为常见和成熟的半导体太阳能光伏器件进行了详细介绍，包括晶硅太阳能电池、非晶硅基薄膜太阳能电池、Ⅲ-V族单结及多结太阳能电池、 $\text{Cu(InGa)Se}_2$  太阳能电池、CdTe 太阳能电池、染料敏化电池和有机太阳能电池。这些半导体太阳能光伏器件具有代表性，掌握了这些器件的结构、原理和制作工艺，对于其他类型的半导体太阳能光伏器件的理解也就比较容易了。

在本书的编写过程中，编者既重视各章内容之间的相互联系，又适当保持了各章的相对独立性。第一章和第二章为本书的基础理论介绍，在阅读后面章节前应先行阅读这两章。第三章至第九章分别介绍各种类型的半导体太阳能光伏器件，这些章节可根据需要进行选读，而不影响对章节内容的理解。第十章在前面各章的基础上进一步讨论半导体太阳能光伏器件的理论效率及实现最大效率的途径，以使读者对半导体太阳能光伏器件的进一步发展有一个完整的概念。

本书可供半导体专业高年级本科生及研究生学习使用，对从事半导体太阳能光伏器件研究、生产的科研人员和工程师也有重要的参考价值，材料、能源、信息等领域的科技人员以及对半导体光伏器件感兴趣的其他相关人员也可从本书中获得太阳能光伏器件的相关知识。

在本书的编写过程中，西安电子科技大学宽带隙半导体技术国家重点学科实验室给予了重要支持，在这里表示诚挚的感谢。另外，陈大正、王之哲、高洵、孙丽、唐诗、衡婷、张闯等研究生也为本书的编写做了大量工作，在这里一并表示感谢。

由于编者的水平有限，书中难免还存在一些不足之处，殷切希望广大读者批评指正。

编者

2014年9月

# 目 录

<b>第 1 章 太阳能与太阳能电池</b> .....	1	3.1.1 硅材料	48
1.1 能源消耗与太阳能	1	3.1.2 太阳能级硅材料	48
1.2 光伏效应及应用	6	3.1.3 单晶硅的制造	49
1.3 太阳能电池的发展	8	3.1.4 多晶硅的制造	53
1.4 太阳能电池的特性	9	3.1.5 国内太阳能级硅现状	58
1.4.1 光电流与量子效率	9	3.2 晶体硅太阳能电池原理及基本结构	58
1.4.2 开路电压	11	.....	58
1.4.3 光电转换效率	12	3.2.1 晶体硅太阳能电池的原理	58
1.4.4 串联电阻	13	3.2.2 晶体硅太阳能电池的基本结构	59
1.4.5 非理想的二极管特性	14	.....	59
1.5 太阳能电池的应用	14	3.3 晶体硅太阳能电池电特性及限制	
本章参考文献	15	因素	60
<b>第二章 太阳能电池基础</b> .....	17	3.3.1 晶体硅太阳能电池的电特性	60
2.1 光子与太阳能光谱	17	3.3.2 晶体硅太阳能电池效率限制	62
2.1.1 黑体辐射	17	因素	62
2.1.2 太阳能光谱及大气质量	18	3.4 工业生产中的晶体硅太阳能电池	
2.2 太阳能电池器件原理	21	结构与制备流程	63
2.2.1 半导体材料的基本属性	21	3.4.1 工业晶体硅太阳能电池结构	63
2.2.2 载流子的产生、复合与输运	32	3.4.2 工业化基本制作流程	64
2.2.3 半导体结	37	3.5 工艺详解及改进	72
2.3 太阳能电池的效率上限	45	3.5.1 丝网印刷	72
2.3.1 细致平衡原理	45	3.5.2 薄晶圆工艺	75
2.3.2 太阳能电池的最高效率	46	3.5.3 表面钝化工艺	76
本章参考文献	47	3.5.4 选择性发射极技术	77
<b>第三章 晶体硅太阳能电池</b> .....	48	3.5.5 快速加热技术	78
3.1 硅制造工艺	48	3.6 制造多晶硅太阳能电池的一些	
		特殊方法	79
		3.6.1 多晶硅太阳能电池的除杂	79

3.6.2	氢钝化工艺	79	4.4.1	GaInP 太阳能电池	117
3.6.3	光捕获工艺	81	4.4.2	GaAs 太阳能电池	126
3.7	高效晶体硅太阳能电池技术和结构	83	4.4.3	Ge 太阳能电池	127
3.7.1	带状硅技术	83	4.4.4	隧道结	129
3.7.2	高效低阻硅太阳能电池	83	4.5	高效多结太阳能电池的发展	130
3.7.3	钝化发射极和背面结构电池	84	4.5.1	高效多结太阳能电池存在的 问题	130
3.7.4	发射极钝化及背部局部扩散 结构电池	85	4.5.2	高效多结太阳能电池的发展	131
3.7.5	刻槽埋栅技术	85	本章参考文献	133	
3.7.6	倾斜蒸镀金属接触式太阳能 电池	86	<b>第五章 非晶硅基薄膜太阳能电池</b>	139	
3.7.7	金属穿孔卷绕技术	87	5.1	非晶硅基太阳能电池介绍	139
3.7.8	插指状背电极结构电池	88	5.2	非晶硅材料的特性	141
3.7.9	热载流子太阳能电池	89	5.2.1	非晶硅材料的研究和发展现状	141
3.7.10	背高效表面反射太阳能电池	90	5.2.2	原子结构	142
3.7.11	异质结结构电池	90	5.2.3	非晶硅材料的电子态	143
3.8	晶体硅太阳能电池展望	92	5.2.4	非晶硅的掺杂和电学特性	145
本章参考文献		93	5.2.5	非晶硅合金的带宽调整	146
			5.2.6	非晶硅基薄膜材料的光学性质	147
<b>第四章 高效的 III-V 族单结及多结 太阳能电池</b>		97	5.3	非晶硅薄膜的制备技术和非晶硅 电池的产业化	151
4.1	III-V 族半导体材料	97	5.3.1	常见的 a-Si 薄膜制备技术	151
4.1.1	III-V 族半导体材料的命名	97	5.3.2	非晶硅薄膜生长过程中的反应 动力学	152
4.1.2	III-V 族半导体材料的性质	98	5.3.3	等离子增强化学气相沉积	155
4.2	III-V 族半导体太阳能电池的应用	99	5.3.4	热丝化学气相沉积	158
4.2.1	空间应用	99	5.3.5	微晶硅沉积技术	160
4.2.2	陆地能源应用	102	5.3.6	硅基薄膜材料的优化	163
4.3	III-V 族单结及多结太阳能电池 基础	103	5.3.7	非晶硅太阳能电池生产流程及 产业化	164
4.3.1	直接带隙与间接带隙	103	5.4	非晶硅太阳能电池常见结构及其 工作原理	166
4.3.2	单结及多结太阳能电池效率的 原理限制	103	5.4.1	单结非晶硅薄膜太阳能电池的 结构及工作原理	166
4.3.3	光谱分离	106			
4.3.4	器件结构	116			
4.4	GaInP/GaAs/Ge 多结电池发展及 存在问题	117			



5.4.2 多结非晶硅薄膜太阳能电池的 结构及工作原理 .....	177	7.3.2 前电极 .....	237
5.5 非晶硅太阳能电池的发展过程和 未来展望 .....	182	7.3.3 窗口层 .....	237
5.5.1 非晶硅太阳能电池的发展 过程 .....	182	7.3.4 吸收层 .....	239
5.5.2 未来展望与挑战 .....	184	7.3.5 背接触 .....	244
本章参考文献 .....	184	7.4 CdS/CdTe 结特性 .....	247
<b>第六章 Cu(InGa)Se<sub>2</sub> 太阳能电池</b> .....	188	7.5 CdTe 太阳能电池器件特性 .....	248
6.1 材料特性 .....	188	7.6 CdTe 太阳能电池的发展前景 .....	252
6.1.1 材料结构及组分 .....	188	本章参考文献 .....	255
6.1.2 光学性质 .....	191	<b>第八章 染料敏化太阳能电池</b> .....	258
6.1.3 电学性质 .....	193	8.1 引言 .....	258
6.1.4 表面、晶界及衬底 .....	194	8.2 DSSC 器件结构 .....	260
6.2 器件性质 .....	196	8.2.1 导电基底材料 .....	260
6.2.1 光电流的产生 .....	196	8.2.2 纳米多孔半导体薄膜 .....	260
6.2.2 复合 .....	200	8.2.3 染料光敏化剂 .....	260
6.2.3 Cu(InGa)Se <sub>2</sub> /CdS 界面特性 .....	205	8.2.4 电解质 .....	261
6.2.4 渐变带宽器件 .....	208	8.2.5 对电极 .....	261
6.3 Cu(InGa)Se <sub>2</sub> 太阳能电池器件的 制造 .....	210	8.3 DSSC 器件的工作原理 .....	261
6.3.1 材料的沉积技术 .....	210	8.4 器件的制造工艺 .....	267
6.3.2 结与器件的形成 .....	216	8.4.1 二氧化钛纳米晶薄膜电极的 制备 .....	267
6.4 Cu(InGa)Se <sub>2</sub> 太阳能电池的发展 .....	224	8.4.2 染料在 TiO <sub>2</sub> 纳米薄膜中的 填充 .....	268
6.4.1 CIGS 太阳能电池的发展过程 .....	224	8.4.3 电解液的制备 .....	268
6.4.2 发展中的挑战 .....	227	8.4.4 对电极的制备 .....	269
6.4.3 发展前景预测 .....	227	8.5 DSSC 器件的进展 .....	269
本章参考文献 .....	229	8.5.1 工作电极 .....	269
<b>第七章 CdTe 太阳能电池</b> .....	232	8.5.2 电解质 .....	272
7.1 引言 .....	232	8.5.3 染料敏化剂 .....	277
7.2 材料属性 .....	234	8.5.4 对电极 .....	285
7.3 CdTe 太阳能电池的结构及工艺 实现 .....	236	8.6 展望 .....	290
7.3.1 衬底 .....	236	本章参考文献 .....	291
		<b>第九章 有机太阳能电池</b> .....	298
		9.1 有机半导体的特点 .....	299
		9.2 有机半导体光伏器件材料 .....	301
		9.2.1 电子给体材料 .....	302

9.2.2	电子受体材料 .....	304	9.7	有机太阳能电池衰退机理 .....	335
9.2.3	缓冲层界面材料 .....	305	9.7.1	器件的化学衰退 .....	336
9.2.4	代替 ITO 的一些新型材料 .....	310	9.7.2	物理及机械衰退机理 .....	338
9.3	有机太阳能电池的基本结构 .....	311	9.7.3	器件的封装 .....	338
9.3.1	单层有机太阳能电池 .....	311	9.8	有机太阳能电池的制造工艺 .....	339
9.3.2	双层异质结有机太阳能电池 .....	311	9.9	有机太阳能电池的发展 .....	344
9.3.3	体异质结有机太阳能电池 .....	313	本章参考文献 .....	346	
9.3.4	有机太阳能电池的常规结构及 反转结构 .....	314	<b>第十章 高效半导体光伏器件概述</b> .....	348	
9.4	有机太阳能电池的工作原理 .....	315	10.1	太阳能电池的效率 .....	348
9.4.1	光子的吸收 .....	316	10.2	太阳能电池效率的极限 .....	350
9.4.2	激子的产生 .....	317	10.2.1	太阳能电池效率的热力学 极限 .....	350
9.4.3	激子扩散 .....	317	10.2.2	太阳能电池效率的细致平衡 原理极限 .....	351
9.4.4	激子的分离 .....	318	10.3	含有多带隙吸光结构的电池 .....	355
9.4.5	电荷传输 .....	321	10.3.1	叠层太阳能电池 .....	356
9.4.6	电极的收集 .....	322	10.3.2	中间带隙及多带隙太阳能 电池 .....	358
9.5	有机太阳能电池的宏观电学特性 .....	323	10.4	热载流子太阳能电池 .....	362
9.5.1	开路电压 .....	324	10.5	碰撞电离太阳能电池 .....	367
9.5.2	短路电流和填充因子 .....	325	10.6	总结 .....	369
9.6	有机叠层太阳能电池 .....	325	本章参考文献 .....	370	
9.6.1	有机叠层电池机理 .....	327			
9.6.2	有机叠层电池结构介绍 .....	328			
9.6.3	叠层结构中的中间连接层 工程 .....	332			

# 第一章 太阳能与太阳能电池

对能源需求的不断增长和能源的有限供应已经开始制约世界经济的发展,能源问题越来越受到人们的关注,而不合理的资源利用导致的环境污染也严重影响着人类的生活质量。在这种情况下,人们不得不把目光投向新型、清洁、可再生的绿色能源——风能、潮汐能、水力能、生物能以及太阳能等,而实际上,上述可再生能源本质都来源于太阳能。太阳能的利用有很多种,可以利用光的热效应,将太阳辐射转化为热能;也可以利用光的伏特效应将太阳辐射直接转换成电能等。其中,太阳能的光电利用成为近些年来发展最快、最具活力的研究领域<sup>[1]</sup>。本章将在阐述光伏效应原理的基础上具体介绍太阳能电池的发展历史、太阳能电池的特性以及太阳能电池的应用。

## 1.1 能源消耗与太阳能

工业革命以来,世界经济呈现飞速发展。经济的增长与能源资源的开发和利用是紧密相关的,所以要确保经济的稳定可持续发展,有必要了解能源资源的利用情况,以及为将来可能出现或已经出现的能源资源问题早做准备,确保经济发展不会受到制约,甚至还要尽可能地找到新途径、新方法,使得能源资源促进经济的发展,造福于人类。

### 1. 世界能源现状及特点

世界能源的现状和特点如下:

(1) 经济迅猛发展和人口日益增长导致地球上一次性能源消费量不断增加。

随着世界经济规模的不断扩大,世界能源消费量持续增长。1990年世界所有国家的国内生产总值为26.5万亿美元(按1995年不变价格计算),2000年达到34.3万亿美元,到2012年更是突破了72.6万亿美元。我国的经济发展更为迅速,2012年国内生产总值超过8.3万亿美元,位居全球第二<sup>[2]</sup>。跟随经济一同发展的是对能源需求的不断增加。根据IEA(国际能源署)、OECD(经济合作与发展组织)和世界银行统计,世界人口由1990年的52.6亿增加到2008年的66.8亿,平均能源消耗由1990年的19.4千千瓦时增加到2008年

的 21.3 千千瓦时,这使得世界总的能源消耗由 1990 年的 102.3 千太瓦时增加到 2008 年的 142.3 千太瓦时,增加了 39%<sup>[3]</sup>。

(2) 各国能源消费状况呈现不同的增长模式,发展中国家增长速度明显高于发达国家。

过去 20 年来,美国、欧盟、中东、中国、拉美、非洲及印度等地区的能源消费总量均有所增加,但是经济、科技与社会比较发达的北美洲和欧洲两大地区的增长速度相对缓慢,1990 年到 2008 年间美国能源消耗只增长了 20%,欧盟增长更低,只有 7%。相对于这些发达地区,发展中地区能源消耗增长迅速,1990 年到 2008 年间,中东能源消耗增长了 170%,中国增长了 146%,印度增长了 91%,非洲增长了 70%,拉美增长了 66%<sup>[3]</sup>。发达国家的能源消费量占世界总消费量的比例因此也逐年下降,其主要原因有:一是发达国家的经济发展已进入到后工业化阶段,经济向低能耗、高产出的产业结构发展,高能耗的制造业逐步转向发展中国家;二是发达国家高度重视节能与提高能源使用效率。

(3) 世界能源消费结构趋向优质化,但地区差异仍然很大。

自 19 世纪 70 年代的产业革命以来,化石燃料的消费量急剧增长。初期主要是以煤炭为主,进入 20 世纪,特别是第二次世界大战以来,石油和天然气的生产与消费持续上升,石油于 20 世纪 60 年代首次超过煤炭,跃居一次性能源的主导地位。虽然 20 世纪 70 年代世界经历了两次石油危机,但世界石油消费量却没有丝毫减少的趋势。此后,石油、煤炭所占比例缓慢下降,天然气的比例上升。同时,核能、风能、水力、地热等其它形式的新能源逐渐被开发和利用,形成了目前以化石燃料为主和可再生能源、新能源并存的能源结构格局。到 2008 年年底,化石能源仍是世界的主要能源,在世界能源消耗量中,石油占 33.5%、煤炭占 26.8%、天然气占 20.9%;非化石能源和可再生能源虽然增长很快,但仍保持较低的比例,其中核能占 5.8%,水力占 2.2%,其它可再生能源约占 10.6%<sup>[3]</sup>;此外,还有少量其它能源约占 0.2%。

由于中东地区油气资源最为丰富,开采成本极低,故中东能源消费主要为石油和天然气,其比例明显高于世界平均水平,居世界之首。在亚太地区,中国、印度等国家煤炭资源丰富,煤炭在能源消费结构中所占比例相对较高,故在亚太地区的能源结构中,石油和天然气的比例偏低。

(4) 世界能源资源仍比较丰富,但能源贸易及运输压力增大。

根据《2013 年 BP 世界能源统计》,截止到 2012 年年底,全世界剩余石油探明可采储量为 1668.9 亿桶,其中,中东地区占 48.4%,北美洲占 13.2%,中、南美洲占 19.7%,欧洲及欧亚大陆占 8.4%,非洲占 7.8%,亚太地区占 2.5%。通过对比各地区石油产量与消费量可以发现,中东地区需要向外大量输出石油,非洲和中南美洲的石油产量也大于消费量,而亚太、北美和欧洲的产消存在巨大缺口。

煤炭资源的分布也存在巨大的不平衡性。截止到 2012 年年底,世界煤炭剩余可采储量

为 8609.38 亿吨, 欧洲及欧亚大陆、北美和亚太三个地区是世界煤炭主要分布地区, 三个地区合计占世界总量的 94.8% 左右。同时, 天然气剩余可采储量为 187.3 万亿立方米。中东和欧洲是世界天然气资源最丰富的地区, 两个地区占世界总量的 74.2%, 而其它地区的份额较低。随着世界一些地区能源资源的相对枯竭, 世界各地及国家之间的能源贸易量将进一步增大, 能源运输需求也相应增大, 能源储运设施及能源供应安全等问题将日益受到重视。

(5) 可再生能源特别是太阳能储量巨大, 但开发利用并不充分。

可再生能源为来自大自然的能源, 例如太阳能、风力、潮汐能、地热能等, 是取之不尽、用之不竭的能源, 会自动再生, 是相对于会穷尽的不可再生能源的一种能源。单单是太阳光, 就可以满足全世界 2850 倍的能源需求。风能可满足全世界 200 倍的能源需求, 水力可满足全世界 3 倍的能源需求, 生物质能可满足全世界 20 倍的能源需求, 地热能可满足全世界 5 倍的能源需求。但是现今人类实际使用的可再生能源远远低于其可被开发的潜力: 2008 年全球有 19% 的能源需求来自可再生能源, 其中 13% 为传统的生物能, 多半用于热能(例如烧柴), 3.2% 来自水力, 来自新的可再生能源(小于 20 MW 的水力, 现代的生物质能、风能、太阳能、地热能等)则只有 2.7%<sup>[4]</sup>。

## 2. 我国能源消耗现状

我国是一个能源生产大国和消费大国, 拥有丰富的化石能源资源。2006 年, 我国煤炭保有资源量为 10 345 亿吨, 探明剩余可采储量约占全世界的 13%, 列世界第三位。但是我国的人均能源资源拥有量较低, 煤炭和水力资源人均拥有量仅相当于世界平均水平的 50%, 石油、天然气人均资源拥有量仅为世界平均水平的 1/15 左右。能源资源赋存不均衡, 开发难度较大, 已探明石油、天然气等优质能源储量严重不足。再加上能源利用技术落后, 利用率低下, 在经济高速增长的情况下, 我国能源的消耗速度比其它国家更快, 能源枯竭的威胁可能来得更早、更严重。世界和我国未来主要传统能源储量可开采时间预测如表 1.1 所示。日益增长的能源需求造成的能源压力迫使我们不得不寻找解决能源危机的突围之路。

表 1.1 世界和我国未来主要传统能源储量可开采时间(年)预测<sup>[5]</sup>

能源种类	太阳能	煤	石油	天然气	铀
世界	无穷大	230	50	60	70
中国	无穷大	100	40	40	50

我国是世界上少数几个以煤为主要能源的国家, 一次性能源生产和消费 65% 左右为煤炭。由于大量使用煤炭, 使我国 66% 的城市大气中颗粒物含量以及 22% 的城市空气二氧化硫含量超过国家空气质量二级标准。长期以来这种以煤炭为主的能源结构和单一的能源消

费模式带来了严重的环境污染。伴随着经济的快速发展和能源需求量的持续增长,化石燃料燃烧所产生的温室气体排放给环境造成了越来越沉重的压力。面对当前化石能源消耗带来的严重环境危机,调整能源结构已迫在眉睫<sup>[6]</sup>,特别是近几年我国大面积出现雾霾,PM2.5含量在很多地区居高不下,使得我们不得不对能源的消耗进行调整。

### 3. 太阳能资源的开发及利用

日益突出的能源短缺和环境污染问题迫使人们不得不寻找新的清洁能源。新能源应该同时符合两个条件:一是蕴藏丰富,不会枯竭;二是安全、清洁,不会威胁人类和破坏环境。目前,新能源主要有太阳能、生物能、地热能、潮汐能、风能、核能、氢能等,其中最理想的能源是太阳能。太阳能(Solar Energy)一般是指太阳光的辐射能量。地球上的生物就主要依靠太阳提供的热和光生存,而自古人类也懂得以阳光晒干物件,并作为保存食物的方法,如制盐和晒咸鱼等。但在化石燃料日益减少的情况下,人类才有意进一步发展太阳能的利用<sup>[7]</sup>。

太阳能的利用方式可以分成以下三种:

- (1) 间接利用太阳能:化石能源、生物质能(光能转化为化学能)。
- (2) 直接利用太阳能:集热器(有平板型集热器和聚光式集热器)(光能转化为热能)。
- (3) 太阳能电池:一般应用在电站、人造卫星、宇宙飞船、打火机、手表等方面,近期也作为我国电力能源的重要来源之一(光能转化为电能)。

之所以选择发展太阳能作为未来能源资源的主力,主要是因为新型清洁可再生的太阳能具有以下独特的优势:

(1) 储量丰富。太阳每秒放射的能量相当于  $1.6 \times 10^{23}$  kW,其中仅有极微小的部分(约22亿分之一)到达地球。即便这样,太阳每秒辐射到达地球表面的能量还高达  $8 \times 10^{13}$  kW,相当于  $6 \times 10^9$  t 标准煤。按此计算,一年内到达地面的太阳能总量折合成标准煤共约  $1.892 \times 10^{16}$  t。德国太阳能专家伯尔科说,只需开发非洲部分地区的太阳能发电,便能满足全世界的电力需求。而且太阳辐射可以源源不断地供给地球,取之不尽,用之不竭。

(2) 普遍性。太阳能不像其它能源那样具有分布的偏集性。世界不少国家因为能源分布的不平衡性不得不花费庞大的输电设备费用或交通费用。而太阳能处处都可就地利用,有利于缓解能源供需矛盾及运输压力,对解决偏僻边远地区及交通不便的农村、海岛的能源供应,更有其巨大的优越性。

(3) 无污染性。人类比以往更强烈地认识到,为实现可持续发展,环境保护是发展过程中不可或缺的组成部分,环境与发展不能相互脱离。在众多环境问题中,矿物燃料燃烧形成的污染十分严重。而利用太阳能作能源,没有废渣、废气、废水排出,无噪声,不产生有害物质,这在环境污染日趋严重的今天显得尤为可贵。

(4) 经济性。电站的经济性主要由建造费、燃料费、运行管理维修及环保投资等几部分组成。而利用太阳能发电,既不会污染环境,又取之不尽、无处不在,因此从长期来看,

其发电成本要小得多。专家们的预测和研究一致认为：21 世纪人类最洁净、最廉价的能源就是太阳能。

当然，太阳能利用也有其缺点，如能量密度低、不易收集、不稳定、随季节气候和天气昼夜变化而变化等，且现阶段发电成本相对较高。但总的来说，太阳能有很多其它能源无法相比的优点，有极其广阔的利用前景<sup>[8]</sup>。

我国幅员广阔，多处于中低纬度，太阳高度角较大，辐射较强，太阳能资源十分丰富。图 1.1 所示为我国太阳能资源分布图。

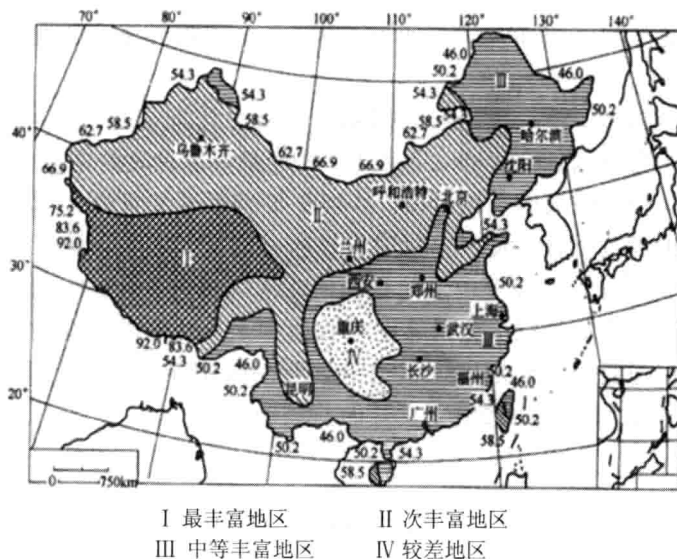


图 1.1 我国太阳能资源分布图

我国太阳辐射年总量大约为  $3300 \sim 8300 \text{ MJ/m}^2$ 。根据各地太阳辐射量的差异和太阳能利用特点，可将全国分为四种地域类型。

(1) 最丰富地区：包括青藏高原及其边缘地区。该地区最大的特点是地势高，空气稀薄，水汽和尘埃含量少，透明度高，太阳辐射特别强烈，辐射量明显高于同纬度的平原地区。此外，该地区年降雨量少，且多夜雨，日照时数长，一般全年在  $2800 \sim 3200$  小时，对太阳能的利用极其有利。

(2) 次丰富地区：包括新疆、宁夏大部、甘肃、内蒙古西部及陕西、山西的北部。该地区处于我国西北干旱区，云量少，晴天多，日照时数是全国最长的，全年大部在 3200 小时以上，新疆北部可长达 3500 小时，有利于太阳能的利用。虽然冬季时间长、气温低，全年日均温高于  $0^\circ\text{C}$  的天数仅为  $100 \sim 150$  天，但由于气温日差较大，冬季中午气温可达到较高温度，也有利于太阳能的利用。风沙日多、风速大是该地区的不利因素。

(3) 中等丰富地区：秦岭—淮河以北的北方地区以及福建和广东的南部、台湾和海南的大部。北方地区利用太阳能的优势在于晴天多、云量少、日照时间长，全年日照时数大部分地区在 2400 小时以上。不足是冬季严寒、气温低、辐射强度弱，一般有 3~5 个月不利于太阳能利用。此外，北方地区普遍风大，特别是春秋季节，对太阳能利用装置的热效率也有较大影响。

(4) 较差地区：秦岭—淮河以南的南方地区，尤其是四川、贵州、湖北南部和湖南西部。南方地区虽然纬度低、气温高，全年日均温高于 0℃ 的日期大部在 350 天以上，但由于受季风影响阴雨天多，云量大，全年可利用的日照时数并不多，大多数地区在 2000 小时以下，川南、黔东北仅有 1100 小时左右。四川、贵州是全国阴天最多的地区，成都平均全年有阴天 244.6 天。

从我国太阳能资源看，前三类地区太阳辐射总量多接近或超过 5500 MJ/m<sup>2</sup>，是资源较为丰富的地区，约为全国总面积的 2/3 以上。即便是资源较差的南方地区，由于纬度低，太阳辐射强度较高，仍有较大的利用价值，特别是带有聚光装置的太阳能利用器，可以充分发挥其效能。从世界范围看，太阳能利用较好的是欧洲、日本等地区。欧洲大部分地区的纬度位置比我国高，日本的纬度位置与我国华北地区相当，但这些地区的气候受海洋影响较大，太阳能资源远不如我国。美国纬度与我国相当，太阳辐射也很丰富，特别是南部和西部沙漠地区，但像我国青藏地区这样得天独厚的太阳能资源，在世界上也是少见的，资源上的优势为我国太阳能利用提供了良好的前提条件<sup>[8]</sup>。

## 1.2 光伏效应及应用

1839 年，法国科学家 A. E. Becquerel 首先发现了“光生伏特效应”，简称“光伏效应”。所谓光伏效应，简单地说，就是当物体受到光照时，其内部的电荷分布状态发生变化而产生电动势和电流的一种效应。它首先是由光子(光波)转化为电子、光能量转化为电能的过程；其次，是形成电压的过程。在气体、液体和固体中均可产生这种效应，但在固体尤其是半导体中，光能转换成电能的效率特别高。因此半导体中的光伏效应引起了人们的格外关注。

光具有波粒二象性，在太阳能电池研究中，光被看做粒子，光的单元能量称为光子，与光子的振动频率成比例，为  $E = h\nu$ ，其中， $E$  为光子能量， $\nu$  为光子振荡频率，且角频率  $\omega = 2\pi\nu$ 。为保证光子的有效吸收，光子的能量必须满足：

$$h\nu \geq E_g = h\nu_0 \quad (1.1)$$

其中， $E_g$  为材料禁带宽度。等于  $E_g$  的光子能量  $h\nu_0$  是可能产生电子—空穴对的最低光子能量，称为本征吸收限。相应的波长最大值为



$$\lambda_0 = c \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{c}{\nu_0}$$

其中,  $c$  为光速, 真空中为  $3 \times 10^8$  m/s, 且吸收的最大波长与禁带宽度  $E_g$  的关系为

$$\lambda_0 = \frac{1.24}{E_g(\text{eV})} (\mu\text{m}) \quad (1.2)$$

当光的能量小于  $h\nu_0$  或波长大于  $\lambda_0$  时, 吸收系数迅速下降。  $E=h\nu$  关系对于研究太阳能电池的工作特性和提高效率具有重要意义。

当入射光垂直入射到 PN 结表面时, 只要结深足够浅, 符合  $d < 1/\alpha$  条件(其中  $\alpha$  是材料的吸收系数,  $\alpha = 4\pi\nu\kappa/c$  是波长的函数,  $\kappa$  为消光系数), 光就可以到达势垒区或更深的地方。入射光中光子能量  $h\nu \geq E_g = h\nu_0$  的光子由于本征吸收而在结的两边产生电子—空穴对。在光激发下多数载流子的浓度一般改变很小, 而少数载流子的浓度却变化很大。

如图 1.2 所示, 由于 PN 结势垒区内存在较强的由 n 区指向 p 区的内建电场, 结两边的光生少数载流子受该电场的作用, 各自向相反方向运动: p 区的电子穿过 PN 结进入 n 区; n 区的空穴进入 p 区, p 端电势升高, n 端电势降低, 于是在 PN 结两端形成了光生电动势, 这就是 PN 结的光生伏特效应。由于光照产生的载流子各自向相反方向运动, 从而

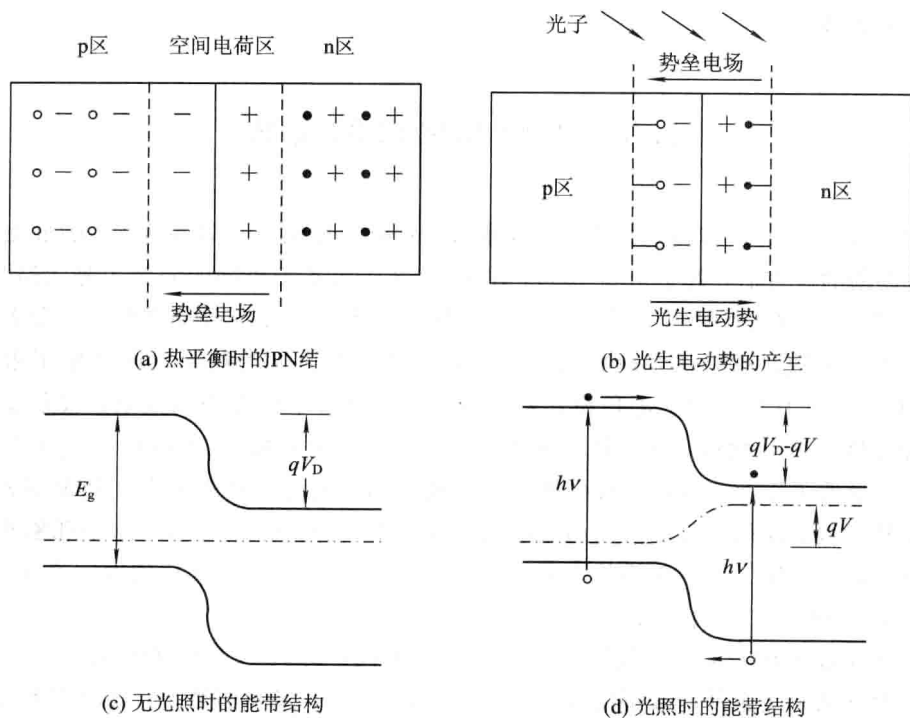


图 1.2 光伏效应能带图