

半导体科学与技术丛书

# 太阳能电池基础与应用

熊绍珍 朱美芳 主编



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

半导体科学与技术丛书

# 太阳能电池基础与应用

熊绍珍 朱美芳 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书从社会发展和生态保护以及能源需求角度出发,阐述光伏利用太阳能的必然性与重要性;讲述半导体基础理论及光伏电池的基本原理。结合该领域的进展,既全面深入地介绍了常规晶体硅电池、III-V 族化合物电池,同时又对 CIGS 电池、CdTe 电池、硅基薄膜电池、染料敏化电池、有机电池等各种不同薄膜电池的光伏材料、电池结构及其工艺特色和技术发展予以详细阐述。除叙述光伏应用电力系统、常规应用及应用示例外,还从发展角度讲述了微电子学在未来能源领域中开发应用的途径。最后对更高效率光伏电池的新概念进行了综合的介绍与展望。

本书可作为高等院校高年级学生、研究生的教材或参考书,也可作为光伏电池、光电子器件科学及相关技术领域的科研人员、工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

太阳能电池基础与应用/熊绍珍,朱美芳主编. —北京:科学出版社,2009  
(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-025549-5

I. 太… II. ①熊…②朱… III. 太阳能电池 IV. TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 162872 号

责任编辑:张 静 于宏丽/责任校对:邹慧卿

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009 年 10 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 10 月第一次印刷 印张:40 1/2

印数:1—2 000 字数:790 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

## 《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问：王守武 汤定元 王守觉

顾问：(按姓氏汉语拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾 沈学础  
王 圩 王启明 王阳元 王占国 吴德馨 郑厚植  
郑有焯

主 编：夏建白

副主编：陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委：(按姓氏汉语拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林  
黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深  
刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标  
申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光  
杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣  
张国义 赵元富 祝宁华

## 《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动本世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为发展我国的半导体事业做出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

## 序 言

当今，越来越多的人认为，不论是通过光热途径还是光伏途径，直接应用太阳能不可避免地将成为人类使用能源的方式，特别是，这种方式将成为人类最终使用能源的重要组成部分。太阳能将在 21 世纪（或者可能在 22 世纪内）世界范围内直接替代数十亿吨人类现在主要使用的化石能源。太阳能具有环境友好特性，当前太阳能的一些直接应用，特别是前面提到的“光明前景”，驱使人们在言论中、在宣传上、在各国政策方面、在直接或风险投资方面都给予太阳能事业越来越强烈的支持。世界各国也确立了更多的太阳能项目，其中有一些在十万千瓦以上。这些情况的确使人激动，也将以前所未有的力量与速度推动整个太阳能事业，使太阳能大规模的使用更早到来。就拿我国来说，未来如果十几亿人都能过上“小康”的现代生活；如果我国要有与其他发达国家相比的生产能力与防卫能力；如果我国要承担在世界上应承担的责任，即便节能水平能与美、欧、日相当，到 2050 年左右我国能耗也将达到 40 亿~50 亿吨标煤以上，我国发电能力也将达十几亿千瓦电功率。有些人还认为这些是比较保守的估计，因为到那时我国人均年能耗也只约是美国的 1/3，西欧和日本的一半。长期支撑这样大的能耗，并考虑到我国资源情况及国际环境和我国的环境状况，到 22 世纪初如果不能用非化石能源，如核能、太阳能，替代相当一部分化石能源，我们国家、我们民族的发展都会受重大影响。因此，大规模推进太阳能的发展和运用，对我国尤为重要。这里特别强调的是着眼于为大规模发展太阳能、使太阳能在我国整个能源结构中占相当比重而去工作、去布局。在上述背景下，出版该书是非常有意义的。该书比较公正地、全面地介绍各主要光伏太阳能的途径、它们的基本过程及主要技术、它们各自的特点及发展前景。该书各章的作者基本上都是我国在各光伏太阳能途径上研究、开发的领军人物，因此各章除了介绍各途径外，对途径发展的分析和讨论，也是有很多亲身体会和真知灼见的。应该说，这些体会和见解是我国多年来发展太阳能工作的收获，在某种程度上的凝练。这是该书与其他介绍太阳能书籍的一个区别。对于今后越来越多投身太阳能事业的年轻科技工作者来说，阅读该书应该有可能得到更多的收益，产生一些真正的潜移默化。

从该书的结构也可以看出，在今后很多年内，发展大规模太阳能都将是非常艰巨的工作和事业，当今也还只能看成是事业的起始。对所涉及的各种光伏太阳能，各有各的优点，也各有各的问题，尽管都发展多年，但都还未能确切地判断其是否适合于大规模发展。此外，由于太阳能的一些特点，如何在国家能源网

络中接纳一定比例的太阳能，是从现在开始就必须考虑或准备的。例如，是否要发展大规模氢能系统，作为存储及传送太阳能及其他非均匀产能能源（如风能等）的调整、分配，或作为整个能源系统中的储能系统；如果以光伏太阳能途径为主，则发展和建设一个能接纳一定比例非均匀光伏电能输入的电网，其难度也不亚于建设相应规模的光伏电站。这些问题，通常的“环保人士”是不太会提及的，但却是从事太阳能事业的科技工作者、从事当前光伏应用的人士所必须考虑、必须反映的。

相信该书的出版，将会促进我国太阳能事业的发展与扩大。

中国科学院院士 郑州大学教授

霍裕平 2009年7月1日

## 前 言

面临严峻的能源形势和生态环境的恶化，改变现有能源结构、发展可持续发展的绿色能源已成为世界各国极为关注的课题。太阳能电池是从太阳获得洁净能源的主要途径之一，虽然从太阳能电池的发明到现在已有半个世纪，但从来没有像现在这样受到重视和获得高速的发展。《太阳能电池基础与应用》一书受到这样的大环境的推动，成为科学出版社的《半导体科学与技术丛书》之一。

本书旨在全面、深入地介绍光伏器件的工作原理及特性参数、各类电池的结构与制备技术及发展前景，并涉及光伏器件的应用及新型电池的基本概念。同时希望尽可能的反映目前科研和生产的最先进的水平和技术。力求写成一本既有较深基础理论又有实用价值；有实际指导意义又有前瞻性科学意义的光伏书籍，使读者对未来光伏器件发展的新概念和新技术有所启示，并能够成为有参考价值的教科书与光伏电池研究人员的参考书。

本书共分 9 章。从内容而言分 4 个层面：

- 太阳电池的发展史与基础理论（第 1 章，第 2 章）；
- 各类电池的基本结构、技术特点、产业化与展望（第 3~7 章）；
- 光伏应用的基本问题与示例（第 8 章）；
- 新概念电池的详细阐述，现状与展望（第 9 章）。

本书各章的主笔均是长期工作在光伏领域第一线的工作人员与工程技术人员。以他们在进行科研与生产指导时的丰富学识和专业经验，就太阳能电池的原理、相关技术，系统地进行了概括与阐述。

其中第 1 章由熊绍珍编写，该章详细介绍了太阳能电池的发展史，以及由此引出的物理与发展前景的思考。第 2 章由朱美芳和熊绍珍编写，主要内容为光伏电池的物理基础，包括半导体材料与物理的基本性质、太阳能电池工作原理、参数表征及模拟计算等。该章为后续各章提供了必要的基础知识。第 3 章由施正荣编写，主要介绍晶体硅太阳能电池及其组件，特别讨论了高效晶体硅电池产业化前沿中的重要问题。第 4 章由向贤碧及廖显伯编写，主要叙述高效 III-V 族化合物电池的发展和展望。第 5 章由阎宝杰与廖显伯编写，该章全面介绍了硅基薄膜材料与电池的基本性质，硅基薄膜电池的不同结构与工艺，并深入讨论了产业化中的关键问题。第 6 章是由李长健编写的铜铟镓硒化合物薄膜电池，该章全面介绍了铜铟镓硒薄膜材料的基本性质，电池结构与制备技术，讨论了该电池的发展动向。第 7 章由戴松元与李永舫编写，该章对染料敏化电池与有机电池进行了比



较系统深入的介绍。第 8 章由王斯成与李长健编写，该章系统地介绍了太阳能电池实际应用中的相关技术，并结合实际，给出了有意义的示例。最后，第 9 章由朱美芳编写，该章主要介绍了太阳能电池的理论极限效率，以及为获得高的光电转换效率所提出的各类新概念太阳能电池，电池的基本物理过程及技术展望，给读者于深入思考的空间。

我们特别感谢王占国院士、耿新华教授、孙云教授、林原研究员和翟永辉研究员分别对本书第 4，第 5，第 6，第 7 章与第 8 章的审阅。该书受到国家重点基础研究发展计划项目（2006CB202600）的资助。特别感谢 973 项目首席专家戴松元研究员与赵颖教授对本书编写过程中的多方面支持。

在编写过程中，作者力求物理图像表述清晰，数学推导准确，文字叙述流畅。主编最后对全书各章进行了仔细评阅与校对。但由于作者学识有限，时间紧迫，错误及遗漏难免。特别是，本书的出版与近年光伏电池的许多创新性的结果，尤其是与光伏产业年均增长 50% 以上的高速发展相比，仍有不够全面与完善之处。衷心希望能得到广大读者和同行的批评、指正。以便在后续再版中不断完善。

作 者

# 目 录

## 序言

## 前言

<b>第 1 章 光伏发电：人类能源的希望</b> .....	1
1.1 光伏是创造社会发展与能源需求平衡的最佳能源形式 .....	1
1.1.1 能源是当今社会发展水平的标志 .....	1
1.1.2 社会进步要求新能源 .....	2
1.1.3 太阳能是未来能源的主力之一 .....	6
1.2 光伏发电历史与现状 .....	13
1.2.1 光伏里程中的重大事件 .....	13
1.2.2 光伏发展历史的启示——寻找新材料，开发新技术，开拓新领域 .....	18
参考文献 .....	40
<b>第 2 章 光伏原理基础</b> .....	43
2.1 半导体基础 .....	43
2.1.1 半导体材料结构与表征 .....	43
2.1.2 半导体中电子态与能带结构 .....	46
2.1.3 半导体中的杂质与缺陷 .....	53
2.1.4 平衡态载流子分布 .....	54
2.1.5 半导体光吸收 .....	58
2.1.6 非平衡载流子产生与复合 .....	63
2.1.7 载流子输运性质 .....	71
2.2 半导体 pn 结基础 .....	75
2.2.1 热平衡的 pn 结 .....	76
2.2.2 pn 结伏安特性 .....	79
2.2.3 pn 结电容 .....	86
2.2.4 异质结 .....	87
2.3 太阳能电池基础 .....	92
2.3.1 光生伏特效应 .....	92
2.3.2 太阳能电池电流-电压特性分析 .....	92
2.3.3 太阳能电池性能表征 .....	97

2.3.4	量子效率谱	99
2.3.5	太阳能电池效率分析	102
2.3.6	太阳能电池效率损失分析	109
2.3.7	p-i-n 结电池	110
2.4	太阳能电池器件模拟	112
2.4.1	器件模拟的意义	112
2.4.2	硅基薄膜电池的数学模型	114
2.4.3	硅基薄膜电池的光学模拟	119
2.4.4	模拟计算示例	125
	参考文献	132
<b>第3章</b>	<b>晶体硅太阳能电池</b>	<b>136</b>
3.1	晶体硅太阳能电池技术的发展	136
3.1.1	简介	136
3.1.2	早期的硅太阳能电池	136
3.1.3	传统的空间电池	138
3.1.4	背面场	139
3.1.5	紫电池	140
3.1.6	“黑体电池”	141
3.1.7	表面钝化	143
3.1.8	PERL 电池设计	149
3.1.9	总结	153
3.2	高效电池的产业化	154
3.2.1	介绍	154
3.2.2	丝网印刷电池	154
3.2.3	掩埋栅太阳能电池	157
3.2.4	高效背面点接触电极电池	160
3.2.5	HIT 电池	164
3.2.6	Pluto 电池	172
	参考文献	181
<b>第4章</b>	<b>高效 III-V 族化合物太阳能电池</b>	<b>186</b>
4.1	III-V 族化合物材料及太阳能电池的特点	188
4.2	III-V 族化合物太阳能电池的制备方法	193
4.2.1	液相外延技术	193
4.2.2	金属有机化学气相沉积技术	194
4.2.3	分子束外延技术	195

4.3	III-V族化合物太阳电池的发展历史 .....	196
4.3.1	GaAs基系单结太阳电池 .....	196
4.3.2	GaAs基系多结叠层太阳电池 .....	201
4.3.3	III-V族聚光太阳电池 .....	211
4.3.4	薄膜型III-V族太阳电池 .....	214
4.4	III-V族化合物太阳电池的研究热点 .....	216
4.4.1	更多结(三结以上)叠层电池的研究 .....	216
4.4.2	III-V族量子阱、量子点太阳电池 .....	219
4.4.3	热光伏电池 .....	223
4.4.4	分光谱太阳电池的研究 .....	224
4.4.5	其他类型新概念太阳电池 .....	225
	参考文献 .....	226
<b>第5章</b>	<b>硅基薄膜太阳电池 .....</b>	<b>230</b>
5.1	引言 .....	230
5.2	硅基薄膜物理基础及其材料特性 .....	231
5.2.1	硅基薄膜材料的研究历史和发展现状 .....	231
5.2.2	非晶硅基薄膜材料的结构和电子态 .....	232
5.2.3	非晶硅基薄膜材料的电学特性 .....	237
5.2.4	非晶硅基薄膜材料的光学特性 .....	240
5.2.5	非晶硅基薄膜材料的光致变化 .....	247
5.2.6	非晶硅碳和硅锗合金薄膜材料 .....	251
5.2.7	微晶硅及微晶硅薄膜材料 .....	252
5.3	非晶硅基薄膜材料制备方法和沉积动力学 .....	261
5.3.1	非晶硅基薄膜材料制备方法 .....	261
5.3.2	硅基薄膜材料制备过程中的反应动力学 .....	282
5.3.3	硅基薄膜材料的优化 .....	287
5.4	硅基薄膜太阳电池结构及工作原理 .....	299
5.4.1	单结硅基薄膜太阳电池的结构及工作原理 .....	299
5.4.2	多结硅基薄膜太阳电池的结构及工作原理 .....	311
5.4.3	硅薄膜太阳电池的计算机模拟 .....	320
5.5	硅基薄膜太阳电池制备技术及产业化 .....	322
5.5.1	以玻璃为衬底的硅基薄膜太阳电池制备技术 .....	322
5.5.2	柔性衬底,卷-到-卷非晶硅基薄膜太阳电池制备技术 .....	327
5.6	硅基薄膜太阳电池的产业化:现状、发展方向以及未来的展望 .....	333
5.6.1	非晶硅基薄膜太阳电池的优势 .....	334

5.6.2	硅基薄膜太阳能电池所面临的挑战 .....	335
5.6.3	硅基薄膜太阳能电池的发展方向 .....	335
	参考文献 .....	337
<b>第6章</b>	<b>铜铟镓硒薄膜太阳能电池 .....</b>	<b>344</b>
6.1	CIGS 薄膜太阳能电池发展史 .....	344
6.2	CIGS 薄膜太阳能电池吸收层材料 .....	349
6.2.1	CIGS 薄膜的制备方法 .....	349
6.2.2	CIGS 薄膜材料特性 .....	357
6.3	CIGS 薄膜太阳能电池的典型结构 .....	366
6.3.1	Mo 背接触层 .....	366
6.3.2	CdS 缓冲层 .....	367
6.3.3	氧化锌 (ZnO) 窗口层 .....	369
6.3.4	顶电极和减反膜 .....	369
6.3.5	CIGS 薄膜光伏组件 .....	370
6.4	CIGS 薄膜太阳能电池的器件性能 .....	371
6.4.1	CIGS 薄膜太阳能电池的电流-电压方程和输出特性曲线 .....	371
6.4.2	CIGS 薄膜太阳能电池的量子效率 .....	374
6.4.3	CIGS 薄膜太阳能电池的弱光特性 .....	376
6.4.4	CIGS 薄膜太阳能电池的温度特性 .....	379
6.4.5	CIGS 薄膜太阳能电池的抗辐照能力 .....	383
6.4.6	CIGS 薄膜电池的稳定性 .....	385
6.5	CIGS 薄膜太阳能电池的异质结特性 .....	388
6.5.1	CIGS 薄膜太阳能电池异质结能带图 .....	388
6.5.2	能带边失调值 .....	390
6.5.3	贫 Cu 的 CIGS 表面层 .....	392
6.6	柔性衬底 CIGS 薄膜太阳能电池 .....	392
6.6.1	柔性衬底 CIGS 薄膜太阳能电池的性能特点 .....	392
6.6.2	柔性金属衬底 CIGS 太阳能电池 .....	394
6.6.3	聚合物衬底 CIGS 薄膜电池 .....	396
6.6.4	CIGS 柔性光伏组件 .....	397
6.7	CIGS 薄膜太阳能电池的发展动向 .....	397
6.7.1	无 Cd 缓冲层 .....	398
6.7.2	其他 I-III-VI 族化合物半导体材料 .....	399
6.7.3	叠层电池 .....	401
	参考文献 .....	402

---

<b>第 7 章 染料敏化太阳电池</b> .....	408
7.1 引言 .....	408
7.1.1 染料敏化太阳电池的发展历史 .....	408
7.1.2 染料敏化太阳电池的结构和组成 .....	410
7.1.3 染料敏化太阳电池的工作原理 .....	412
7.2 染料敏化太阳电池及材料 .....	413
7.2.1 衬底材料 .....	413
7.2.2 纳米半导体材料 .....	414
7.2.3 染料光敏化剂 .....	420
7.2.4 电解质 .....	425
7.2.5 对电极 .....	432
7.3 有机聚合物太阳电池 .....	432
7.3.1 器件结构和工作原理 .....	434
7.3.2 给体光伏材料 .....	436
7.3.3 受体材料 .....	439
7.4 染料敏化太阳电池性能 .....	441
7.4.1 电化学性能 .....	441
7.4.2 光伏性能 .....	446
7.5 染料敏化太阳电池未来的发展 .....	453
参考文献 .....	455
<b>第 8 章 光伏器件的测试与应用</b> .....	463
8.1 光伏器件的测试 .....	463
8.1.1 太阳常数和大气质量 .....	463
8.1.2 标准测试条件和标准太阳电池 .....	465
8.1.3 光伏器件的基本测量 .....	467
8.1.4 多结叠层太阳电池的测试 .....	475
8.2 光伏发电技术及应用 .....	478
8.2.1 太阳能辐射资源 .....	478
8.2.2 光伏系统的工作原理、技术性能及电子学问题 .....	488
8.2.3 光伏发电应用 .....	533
8.2.4 光伏发电应用系统的设计 .....	542
参考文献 .....	567
<b>第 9 章 高效电池新概念</b> .....	569
9.1 引言 .....	569
9.2 Shockley-Queisser 光伏转换效率理论极限 .....	571

9.2.1	黑体辐射 .....	572
9.2.2	细致平衡原理 .....	574
9.2.3	理想光伏电池的转换效率 .....	577
9.3	多结太阳电池 .....	584
9.4	热载流子太阳电池 .....	591
9.4.1	光生载流子热弛豫过程 .....	591
9.4.2	热载流子太阳电池的理论效率极限 .....	593
9.4.3	热载流子太阳电池的实验研究与进展 .....	596
9.5	碰撞电离太阳电池 .....	598
9.5.1	碰撞电离基本概念 .....	598
9.5.2	碰撞电离太阳电池极限效率 .....	599
9.5.3	碰撞电离电池的实验研究 .....	601
9.6	中间带及多能带太阳电池 .....	602
9.7	热光电及热光子转换器 .....	608
9.7.1	热光伏电池 .....	608
9.7.2	热光子转换器 .....	610
9.8	小结 .....	611
	参考文献 .....	613
<b>附录</b>	.....	617
<b>附录 A</b>	标准 AM1.5 太阳光谱辐照度数据 .....	617
<b>附录 B</b>	铅酸蓄电池的分类、命名和表征 .....	621
B.1	铅酸蓄电池的分类 .....	621
B.2	蓄电池的命名方法、型号组成及其代表意义 .....	621
B.3	电池的表征参量 .....	622
<b>附录 C</b>	典型的单片机及外围电路 .....	623
C.1	CPU、EEPROM、RAM、I/O 单片微处理器 .....	623
C.2	LCD 液晶显示器 .....	624
C.3	自定义 4×4 矩阵键盘 .....	624
C.4	RS232 异步串行通信接口 .....	624
C.5	多路模拟开关和串行 A/D 模数转换器 .....	624
<b>附录 D</b>	脉宽调制方波逆变器产品实例 .....	625
D.1	概述 .....	625
D.2	技术指标 .....	625
D.3	方波逆变器的电路结构和工作原理 .....	625

# 第 1 章 光伏发电：人类能源的希望

熊绍珍 南开大学

从“蒸汽机”到“电动机”的一系列动力技术发明，人们逐渐认识到，能源技术的革新带动人类社会日益进步，并对社会发展起着巨大的推动作用。因此，能源是社会发展的动力，并逐步被人们接受。至今所采用的化石燃料能源，带给人类文明与进步的同时，却因能源需求消耗的大幅提高以及随之带来的环境污染，给人类生存环境造成灾难。因此“改变能源结构，保护地球”成为全球的呼声，被各国政府所关注。最新的资料表明，电解水产生的氢能、太阳光的充分利用，包括光热及阳光发电，是最清洁、环保，取之不尽、用之不竭的可再生能源。即使地球上所有的化石燃料已经用尽，阳光和水依旧存在，这时，它们将继续为人类提供新的能源！实际上深究煤和石油的来源，它们现在所发出的热量，无不是从亿万年前深埋地下时，将从太阳那里得到的能量储存至今，重新转换而来的。也就是说，即使是化石燃料，也来源于太阳！所以说，阳光和水始终是人类赖以生存的支柱！

## 1.1 光伏是创造社会发展与能源需求平衡的最佳能源形式

### 1.1.1 能源是当今社会发展水平的标志

联合国组织编制各类数据、图表，用以表述当今国际社会的各类问题。图 1.1 示出 60 多个国家、占全球人口 90% 以上的国家的人类发展指数（human development index, HDI）与各国人均年电力需求量之间的关系<sup>[1]</sup>，表征各国发展的先进水平。现在很多国家都开始用 HDI 来标志各国的生活质量。这就是说，用电量的多少描述该国人民的生活质量。为了进一步改善生活质量，电力消费要在现有水平上再提高 10 倍以上，即从现在的每人每年的几百度（kW·h）提高到几千度。面对这样强大的电力需求，能源从那里来？显然我们不能选择无节制地燃烧更多的化石燃料、释放更多兆吨级的温室气体（CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub>）；抑或不管是否有办法对大剂量辐射废料进行安全处置，仍然继续不断地建造更多的核工厂。而是应该开发利用不产生污染、可持续再生的清洁能源，以保障世界长期安全稳定的发展。



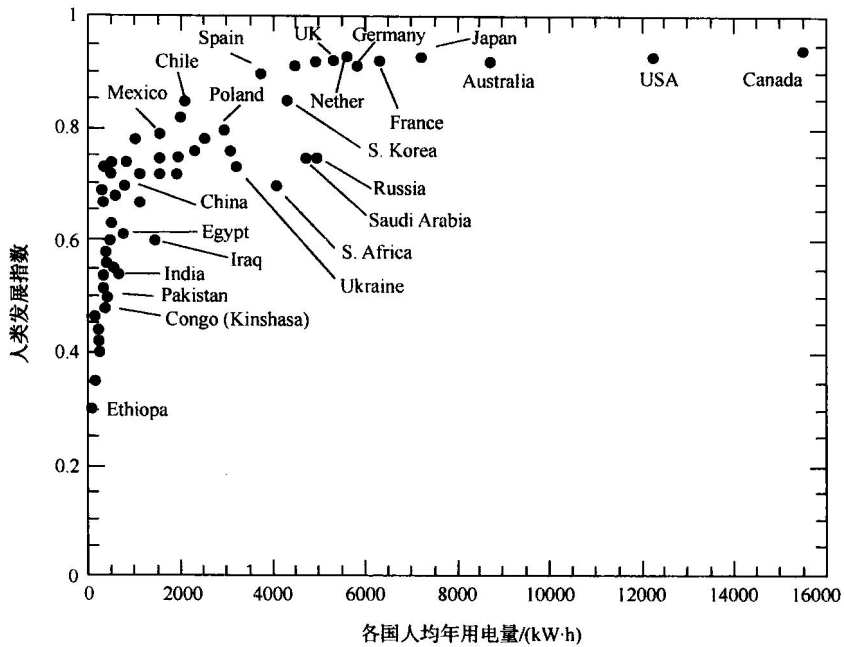


图 1.1 各国 HDI 与人均年电力需求量之间的关系<sup>[1]</sup>

### 1.1.2 社会进步要求新能源

图 1.2 和图 1.3 分别描述人类社会历史与能源需求的关系<sup>[2]</sup> 以及由此带

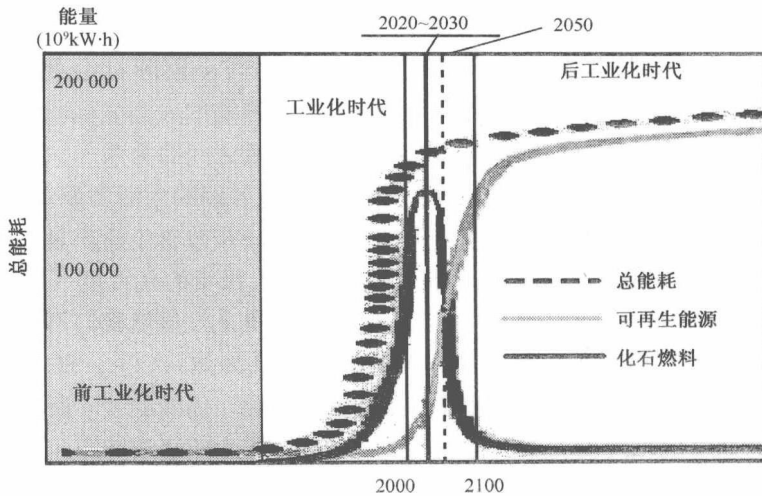


图 1.2 由人类能源演化看能源变革的前瞻性<sup>[2]</sup>