



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

太瓦级太阳能光伏： 绊脚石和机会

**Terawatt Solar Photovoltaics:
Roadblocks and Opportunities**

[美] 陶萌 (Meng Tao) 著
宋伟杰 译



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

太瓦级太阳能光伏： 绊脚石和机会

[美] 陶萌 (Meng Tao) 著
宋伟杰 译



机械工业出版社

本书体现了作者对于太瓦级太阳能光伏的一些绊脚石和瓶颈的观点。原材料的可获取性, 太阳电池制造过程的能量消耗, 太阳能电力的存储, 到了寿命终点的太阳能组件的回收, 都有可能阻止或者严重地延缓太阳能光伏的规模化。在简单地讨论当前太阳电池技术的现状、物理和制造之后, 本书尽最大可能定量地分析了太瓦级太阳能光伏中的这些绊脚石和瓶颈。本书也讨论了一些解决上述绊脚石和瓶颈的令人深思的想法。

本书面向的主要是对能源具有普遍的兴趣同时具有少量技术背景的读者。本书读者最好具有科学或者工程的本科学位, 但并不需要是太阳能光伏的专家。

Translation from English language edition;

Terawatt Solar Photovoltaics: Roadblocks and Opportunities

by Meng Tao

Copyright © 2011 Springer London

Springer London is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社出版, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2015-1931 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

太瓦级太阳能光伏: 绊脚石和机会/ (美) 陶萌著; 宋伟杰译. —北京: 机械工业出版社, 2015. 11

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Terawatt Solar Photovoltaics: Roadblocks and Opportunities

ISBN 978-7-111-52014-6

I. ①太… II. ①陶…②宋… III. ①太阳能发电—研究 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 259995 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘星宁 责任编辑: 刘星宁

责任校对: 刘怡丹 封面设计: 马精明

责任印制: 李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 6.5 印张 · 110 千字

0 001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-52014-6

定价: 48.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com



推 荐 序

在 21 世纪的前 15 年,太阳能光伏是世界上发展速度最快的产业之一。从 2000 年到 2014 年,全球光伏装机总容量从 1.4GW 增长到 189GW,光伏组件平均价格从平均 3 美元/Wp 以上降至 0.6 美元/Wp 以下。光伏技术和光伏产业的发展受到全球瞩目。与此同时,我国光伏产业在全球光伏产业的快速发展中扮演了不可或缺的重要角色。2015 年,我国的光伏电池和组件制造已占全球 60% 左右,我国企业占据了全球十大组件生产企业的六个席位。在光伏发电应用方面,我国光伏系统的安装量也已占全球三分之一左右。目前,根据国家能源局最近公布的数据,我国光伏发电系统投资成本已降至 8 元/W 以下,度电成本降至 0.6 ~ 0.9 元/kWh。可以说,我国光伏产业已经在全球占据了重要地位,同时也具备了更大规模发展的基础。

尽管光伏产业在短期内取得了举世瞩目的成就,但是光伏发电现有的规模距离全球主流能源来源还有较大的距离。迄今为止,光伏仅仅能提供全球 1% 左右的电力,这对全球电力供应影响有限。仅从产业规模来看,光伏发电规模只有达到现在的几十倍以上才会对现有的能源结构产生显著的影响。这使得我们必须深入全面思考现有产业化光伏技术发展 to 更大规模时会遇到的问题。

本书作者陶萌教授从现有产业化太阳电池技术的物理出发,采用跟常规教科书完全不同的思路诠释了光伏器件中关于光 and 电的技术原理。之后他从现有产业化太阳电池技术对自然资源和能源消耗两个大的方面深入讨论了现有光伏技术规模化会碰到的绊脚石和瓶颈问题,并就部分问题的解决提供了值得深入思考的研究思路。本书对光伏物理的阐述深入浅出,对太瓦级光伏的分析数据翔实,值得广大研究人员认真阅读。我国是光伏产业的大国,但在光伏产业技术研究方面,我们距离世界最高水平仍有一定距离。期望本书中文版的出版,能够对我国光伏产业技术研究有所启发,在研究方向选择和研究目标设定方面有所受益。

中国工程院院士

薛群基

原书前言

本书尝试提供太阳能光伏较为全面的图景。它超越了诸如太阳电池物理、制造、成本和效率等通常讨论的关于太阳能光伏的话题。本书想为“什么是阻碍太阳能光伏未来成为能源的重要组成部分”这一问题提供一些深入的思考。换句话说，太阳能光伏在我们未来的能源结构中会扮演多重要的角色？这当然不是一个简单的任务，特别是对于一个作者来说。读者将会发现，本书包含的问题多于答案。

太阳能电力要成为我们生活中的重要的能源来源，光伏的使用规模必须达到几十乃至几百太瓦（峰值）。太阳能光伏所需要的规模产生了许多在其他半导体技术中未曾遇到的绊脚石和瓶颈。本书中绊脚石是指那些如果不解决将会阻止太阳能光伏达到太瓦级水平的问题。瓶颈是指在太阳能光伏中我们希望克服但是在无法解决的情况下可以容忍的困难。效率和成本是瓶颈问题，采用现有产业化太阳电池技术要达到太瓦级水平还存在着更多的基本限制。

本书体现了作者对于太瓦级太阳能光伏的一些绊脚石和瓶颈的观点。原材料的可获取性，太阳电池制造过程中的能量消耗，太阳能电力的存储，到了寿命终点的太阳能组件的回收，都有可能阻止或者严重地延缓太阳能光伏的规模化。在简单地讨论当前太阳电池技术的现状、物理和制造之后，本书尽最大可能定量地分析了太瓦级太阳能光伏中的这些绊脚石和瓶颈。本书也讨论了一些解决上述绊脚石和瓶颈的令人深思的想法。

作者有意地避开了为创新思想提供了许多可能的太阳能光伏“第三代概念”。取而代之的是，本书集中已知的太阳能光伏物理以及探讨今天的太阳能光伏如何能够发展到太瓦级水平。预测未来总是困难的。在许多太阳能光伏第三代概念存在许多不确定性的情况下预测未来实际上是做不到的。

本书分为7章。第1章回答了为什么需要太阳能光伏这一问题。第2章综述了太阳能光伏的现状，包括电池技术及其成本、效率和市场。第3章采用全面而又少用数学表述的方式概述了太阳电池的物理。第4章聚焦于晶体硅太阳电池和组件的制造过程、成本和能量消耗。第5章分析了采用现有产业化太阳电池技术发展太瓦级的一些绊脚石和瓶颈。第6章讨论了太阳电池技术和太阳能电力存储中解决一些绊脚石和瓶颈的想法。第7章总结了有望达到太瓦级的太阳电池技术的主要绊脚石和瓶颈。

本书面向的主要是对能源问题有兴趣同时具有少量技术背景的读者。基于这

一原因,用于理解太阳电池物理的数学被有意地降到最低。尽管如此,本书仍然包含了科学和工程的诸多领域,特别是半导体物理、半导体工艺和材料化学。作者假定本书读者具有一定的技术基础,可能具有科学或者工程的本科学位,但并不需要是太阳能光伏的专家。本书也体现了太阳能光伏涉及多领域的本质,通读本书需要广泛的知识基础。

作者是在帮助在纽约奥尔巴尼(Albany)的SEMATECH建立美国光伏制造联盟的过程中偶然地对太阳能光伏的这些长期远景问题产生了兴趣。2006年夏天,当SEMATECH在寻找新的研究方向时,作者建议了太阳能光伏。在随后的5年里,作者帮助当时SEMATECH负责长远战略的Dan Holladay先生推动了这一想法。到2009年初,Dan与美国能源部接洽成立全国范围内的SEMATECH模式的光伏制造联盟。当这一想法上升到国家层面时,它促使作者思考太阳能光伏的长期的、全景的、国家层面的和全球性的问题。在2009年夏,作者到香港科技大学做短期学术休假,这提供了更多的自由时间仔细思考这些问题,并完成了太瓦级太阳能光伏的自然资源制约的初步分析。作者的这一分析在2010年1月华盛顿特区举办的美国光伏制造联盟研讨会上首次展示。之后这一分析经过了多次的修正和扩展,形成了在本书中现在的形态。

对本书的完成作者必须感谢许多人。SEMATECH的Dan Holladay先生是把作者引入这一主题的人。为了美国太阳电池产业的繁荣,他致力于推动产业界和学术界的合作。他的决断和执着长期鼓舞着作者。德克萨斯大学阿灵顿分校的Qiming Zhang教授是作者的长期合作者。他关于地球上高丰度太阳能光伏材料的第一性原理计算指导了作者及其学生相关的实验工作。亚利桑那州立大学的Ellen Stechel教授和作者曾就太阳能电解用于太阳能电力存储有过深入的讨论。这些讨论形成了金属作为固体燃料用于封闭的可持续的能量循环的思想。作者也要感谢这些年跟他共事的学生和博士后。特别是作者指导毕业的Xiaofei Han博士,他对作者研究组在太瓦级晶体硅和硅之后太阳能光伏的研究做出了多项重要的原创性的贡献。许多在亚利桑那州立大学、德克萨斯大学阿灵顿分校和香港科技大学听过作者关于太阳能光伏课的研究生和本科生也通过他们敏锐直觉的评论和提问对本书做出了贡献。最后但并非最不重要的是感谢作者的家庭成员Lilly、Coby和Della对作者无条件的爱和支持。作者的儿子Coby在2009~2010年之间还是高中十一年级的時候,就太瓦级光伏资源限制的初始分析做了所有的计算工作。现在他在大学读化学工程专业。

陶萌

2014年1月于斯科茨代尔

关于作者

陶萌博士现在是亚利桑那州立大学电子、计算机和能源工程学院的教授。他在江西冶金学院获得冶金本科学位，在浙江大学获得材料科学与工程硕士学位，在伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校获得材料科学与工程博士学位。他的职业生涯中有9年在浙江大学硅材料国家重点实验室工作，并且在德克萨斯大学阿灵顿分校电子工程系担任教授10年。他现在的研究涵盖了在太瓦级太阳能光伏中的许多课题，包括地球中高丰度的材料作为薄膜电池中的光吸收层和透明电极；采用地球中高丰度的铝替代晶体硅太阳能电池中的银电极；太阳能级硅和晶体硅组件回收中高能效的电化学提纯；用于太阳能电力存储的太阳能电力电解。他的研究工作展示了无表面态的Si(100)表面，从而实现了硅上创纪录的低和高的肖特基势垒。他的研究工作也为多种化学气相沉积过程的生长行为开发了一致的可预测的模型。他在位于纽约奥尔巴尼的SEMATECH下的美国光伏制造联盟的建立中起了重要作用。自2006年以来他一直是美国电化学学会21世纪光伏研讨会的组织者。

关于译者

宋伟杰博士现在是中国科学院宁波材料技术与工程研究所研究员，他在清华大学化学系获得化学本科和物理化学博士学位。在日本物质材料研究机构从事四年半博士后研究后进入中国科学院工作。他现在的研究涵盖了薄膜太阳能电池和太阳能电池共性技术中的许多课题，包括低成本薄膜电池原材料；高效薄膜电池光管理；透明导电薄膜电极技术；光伏玻璃减反射膜技术；光伏分布式和离网式应用技术。迄今为止他在国际期刊发表研究论文 110 多篇，授权中国发明专利 30 多项。

目 录

推荐序	
原书前言	
关于作者	
关于译者	
第1章 重大的能源挑战	1
1.1 太阳能	3
1.2 本书范围	5
参考文献	6
第2章 太阳能光伏现状	7
2.1 转换效率	7
2.2 成本	10
2.3 市场	14
参考文献	17
第3章 太阳电池的物理	19
3.1 太阳电池的分类	19
3.2 太阳电池的工作原理	21
3.2.1 太阳电池中的光吸收	21
3.2.2 太阳电池中的电荷分离	24
3.3 太阳电池中的损耗机制	27
3.3.1 光学损耗	28
3.3.2 复合损耗	31
3.3.3 电阻损耗	35
3.4 太阳电池参数	38
参考文献	40
第4章 晶体硅太阳电池和组件的制造	41
4.1 多晶硅原料	41
4.2 单晶硅片	43
4.3 晶体硅太阳电池和组件	45

4.4 硅片制造的替代工艺	48
4.5 太阳能光伏的主要问题初探	50
参考文献	52
第5章 太瓦级太阳能光伏的绊脚石	53
5.1 太瓦级太阳能光伏的要求	53
5.1.1 材料要求	54
5.1.2 器件要求	56
5.1.3 现有电池技术的缺点	56
5.2 原材料的可获取性	57
5.2.1 碲化镉	58
5.2.2 铜铟镓硒	59
5.2.3 晶体硅	59
5.2.4 薄膜硅	60
5.2.5 材料可获取性总结	61
5.3 原材料的年产量	62
5.4 晶体硅太阳能电池和组件的能量消耗	63
5.5 太瓦级太阳能光伏的其他绊脚石	66
5.5.1 太阳能电力的存储	66
5.5.2 太阳能组件的回收	67
参考文献	69
第6章 太瓦级太阳能光伏之路	70
6.1 太瓦级晶体硅太阳能光伏	70
6.1.1 银前电极的替代	71
6.1.2 硅片的低能耗生产	74
6.1.3 硅锭的快速低损耗切割	77
6.2 太瓦级薄膜太阳能光伏	78
6.2.1 薄膜硅太阳能光伏	79
6.2.2 硅之后的薄膜太阳能光伏	80
6.3 太阳能电力的太瓦级存储	84
参考文献	88
第7章 结语	90
参考文献	92

第1章 重大的能源挑战

21 世纪里人类面临的最大的挑战无可置疑是我们必须对过去 200 多年已知的能源基础结构进行根本的改变。这一根本改变由来自化石能源的燃烧释放到地球大气层的二氧化碳 (CO_2) 所导致的全球气候变化所驱动。自从工业革命以来,煤炭、石油和天然气已经成为我们主要的能源来源。它们不得被消减和补充,也将迟早被无碳排放的能源所取代。

我们所面临挑战的规模是巨大的。图 1.1 给出了 Hoffert 等人^[1]对未来全球能源需求的预测。最上面的曲线表明我们当前 (2013 年) 在全球正以大约 18TW (或 10^{12}W) 的平均速度消耗能源。到 2050 年,能源需求预期将达到 30TW, 到 2100 年将达到 46TW。图 1.1 中不同的颜色代表不同能源按照一如往常的预估对未来能源需求的贡献。图 1.1 中曲线上标有的“WRE”代表把大气层中二氧化碳浓度稳定在 350ppm、450ppm、550ppm、650ppm 和 750ppm[⊖]原子比所对应的最大允许的化石燃料能源。这个预测是根据 Wigley、Richels 和 Edmonds^[2] 提出的模型。举个例子,对 2050 年大气中 450ppm 的二氧化碳浓度所能允许的最大化石燃料能约为 8TW, 也就是说清洁能源不得不提供 22TW 来满足总的 30TW 的能源需求。

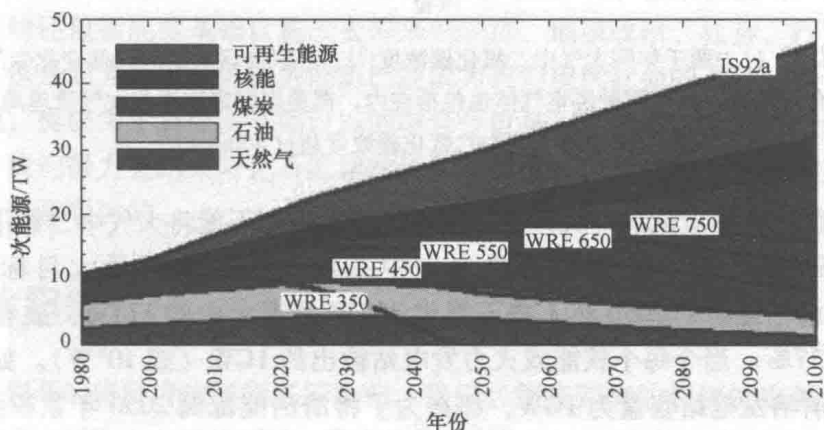


图 1.1 到 2100 年全球能源预期需求^[1]。经 Macmillan Publishers Ltd 允许转载。不同的颜色代表不同能源按照一如往常的预估对未来能源需求的贡献。曲线上标有的“WRE”代表稳定大气层中目标二氧化碳浓度所允许的最大化石燃料能

⊖ ppm: parts permillion, 百万分之一。

如图 1.2 所示，在约从 1800 年开始的工业革命^[3]之前的数千年里，大气中二氧化碳浓度始终稳定在约 280ppm。在 2013 年 5 月，据美国国家海洋与大气管理局的数据，大气中二氧化碳浓度超过 400ppm^[4]。大气中二氧化碳浓度的快速升高改变了到达地球的太阳辐照与反射出的热辐射间脆弱的能量平衡。二氧化碳的其中一个吸收峰位于红外光区约 15 μm 附近。这与地球热辐射光谱的峰位一致^[5]，因此可以留住大气层中的热量，使得地表温度上升，如图 1.3 所示^[6]。从 1880 ~ 2012 年间，地表平均温度几乎上升了 1℃。在过去 30 年的上升速度为每 10 年 0.15℃。

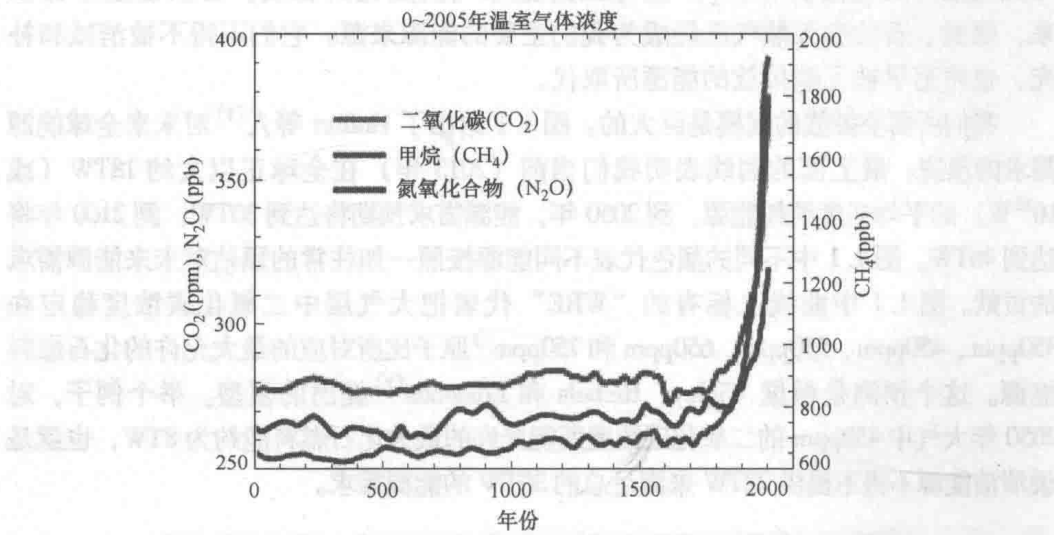


图 1.2 过去两千年间大气中二氧化碳浓度^[3]。经联合国政府间气候变化专门委员会允许转载。其他两种温室气体也包括在内。据美国国家海洋与大气管理局发布，2013 年 5 月大气中二氧化碳浓度超过 400ppm^[4]

由于能源基础设施的巨大惯性，也许已经太迟而不能将大气中二氧化碳浓度稳定在 450ppm。图 1.1 表明如果大气中二氧化碳允许的最大目标浓度为 750ppm，清洁能源到 2050 年不得不提供 30TW 总需求中的 11TW，或者说约占总需求的 37%。当今每个核能或火力发电站输出约 1GW（或 10⁹W）。如果我们要建造的清洁发电站容量为 1GW，那么为了将清洁能源到 2050 年累积到 11TW 的容量，我们不得不在下面 37 年里每天建造一个电站。如果这些无碳排放发电站的标价能减少到与核能发电站相似的水平，即约每瓦 5 美元，那么 11TW 容量大约需要 55 万亿美元投资。取决于系统的规模和当地的太阳光强度，目前基于按时间平均的太阳能光伏的价格为 15 ~ 30 美元/W。按照当前价格 11TW 太阳能光伏将需要 165 ~ 330 万亿美元的投资。如果我们展望到 2100 年并且大气中二氧化碳的目标仍然是 750ppm，那么在 2050 ~ 2100 年之间需要额外增加 17TW 的清

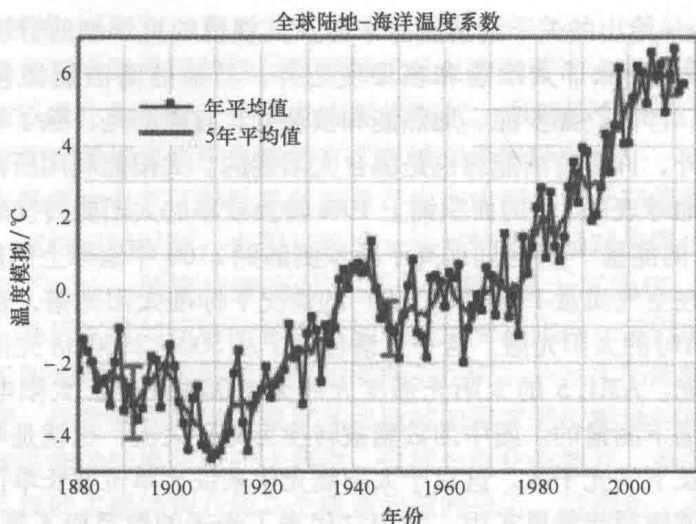


图 1.3 以 1951 ~ 1980 年为基准的从 1880 ~ 2012 年全球平均表面温度的异常^[6]。

在 1880 ~ 2012 年之间表面温度升高了几乎 1°C，
其中过去 30 年中平均增长速度为每 10 年约 0.15°C

洁能源。我们将不得不每天建造一个 1GW 清洁能源发电厂直到 21 世纪结束，其建造总成本按照每瓦 5 美元为 150 万亿美元，或按照每瓦 15 ~ 30 美元计为 450 ~ 900 万亿美元。

这些粗略的计算仅包括新能源基础设施的一部分，也就是能源的产生。新能源的基础设施不仅包括能源的产生，也包括能源的存储、输运和使用。更远一些的相关事物还包括能源基础设施改变带来的经济、地域政治、社会、行为学和环境影响，这是因为廉价的可靠的能源已经成为我们现代社会的基础。对于作者一个人来说，提供关于新能源基础设施的综合分析是不可能的。上述讨论的目的是想说明，我们努力去结束对化石能源的依赖并留给我们子女一个宜居的星球，这一任务是非常艰巨的。

1.1 太阳能

在我们开始建设清洁能源工厂之前，我们必须找到清洁能源的来源。在全球的能源需求达到数十太瓦的时候，我们的选择仅限于一种或者两种清洁能源，这就是太阳能和核聚变。地球接收到的太阳能大约为 $1.2 \times 10^{17} \text{ W}$ ，或者 $1.2 \times 10^5 \text{ TW}$ ，这超过我们目前消耗能源速率的大约 7 000 倍。地球一小时接收的太阳能超过我们整个行星一年的总能量消耗。在可预见的未来之内，只有太阳能具有满足整个星球能源需求的能力。除了核聚变之外，没有其他的我们目前已知的清洁能源具有这样的规模，在未来的能源结构中，这些其他已知的清洁能源只能成为补充的

能源来源。Lewis 给出的关于清洁能源来源及其规模的更详细的分析可以在参考文献 [7] 中找到。除了太阳能和核聚变之外，其他的清洁能源包括风能、水能、生物质能、洋流、潮汐能、地热能和核裂变。有趣的是，除了海洋潮汐、地热能和核能之外，许多清洁能源也是源自太阳能的。太阳能利用所需要的土地也不是很大。把地球表面 1% 的面积铺上 10% 转换效率的太阳能转换装置就可以产生大约 120TW 的能量^[8]，这远远高于所预测的到 2100 年地球上的能量需求。

图 1.4 是在空气质量 1.5 (AM1.5) 的情况下标准太阳光谱，也就是说太阳与天顶成 48°角时的太阳光谱。这一光谱包含了从 300 ~ 2500nm 光谱范围的直射和散射的太阳光。AM1.5 的太阳光强度大约为 1 000W/m²。太阳电池的效率通常是在这一光谱下测量的。图中的数据被转换为光子束流，也就是单位面积单位时间和单位波长下的光子数。这对于太阳能光伏来说比单位波长单位面积的以瓦特为单位的光谱辐照能量更实用，因为它代表了光子的数目而不需要是能量数。它决定太阳光所产生的载流子的数目。

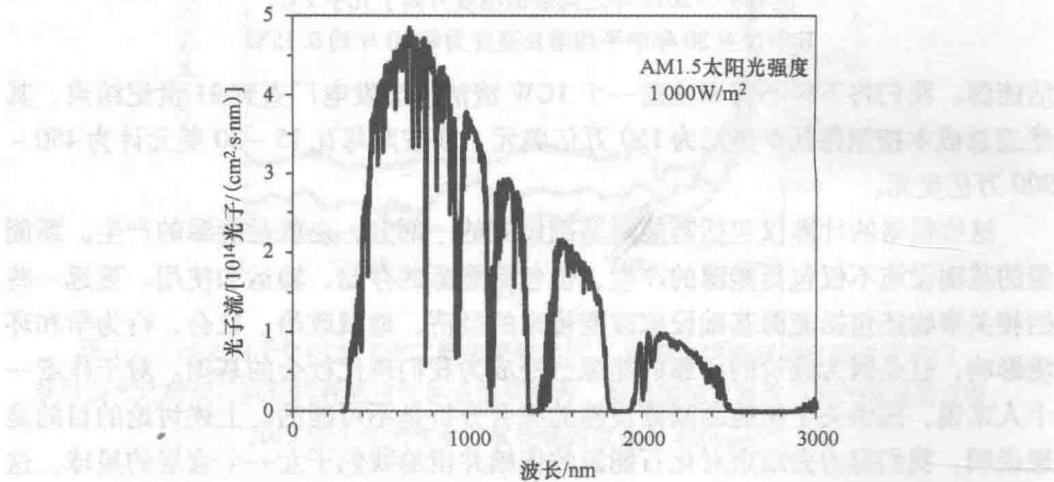


图 1.4 AM1.5 的参考太阳光谱^[9]。也就是说太阳大约是在天顶约 48°。这一光谱包含了直射和散射的太阳光，其总功率大约为 1 000W/m²。数据是以光子流为单位给出的，因为光子数决定了太阳光所能产生的载流子数。

目前核聚变还没有被证明为可控的和可靠的产生能源的方法，而多种太阳能利用技术已经获得产业应用。美国能源部的一个题为“太阳能利用基础研究需求”的报告提供了把太阳能从光能转换为其他多种更便于应用的能量形式的技术介绍^[8]。总的来说，有三种令人感兴趣把太阳能直接转换为其他形式能源的转换过程：

- 1) 光电转换；
- 2) 光化学转换；

3) 光热转换。

我们日常生活中最常见的两种能源形式是电力和石油。光电和光化学转换可以为化石能源以及化石能源产生的电力提供替代。虽然不如光电和光化学流行,热能也以热空气或者热水集中供热的方式在城市里出现。

与核能和燃煤发电厂等受控的能量产生方式相比,太阳能是一种难以预测的能量来源。在给定的时刻,太阳与地球上任何位置的相对位置可以相当精确地预测,这确定了对这一给定位置当时太阳光强度的最大可能值。与这一数值相比,天气和人类活动诸如污染的影响更加难以预测。此外,我们的能量需求经常与通常在中午达到峰值的太阳能产生的周期不匹配。一旦太阳能转换为电能、化学能或者热能,经常需要为以后或者其他地域的需求进行能量的存储和输送。

太阳能到电能的转换采用光伏器件,包括光电化学器件。本书将提供太阳能光伏达到太瓦级的主要绊脚石和几个瓶颈问题的分析。特别是,本书将提供一个关于太瓦级太阳能光伏的自然资源限制的定量分析。光化学转换把太阳能转化存储在化学键里。产生的太阳能燃料可以采用与石油输运相似的方法运输。换句话说,光化学转换把太阳能产生和存储合并为一步,因此与其他两个转换过程相比具有先发优势。光化学转换的一个例子是光解水,即太阳能把水分子(H_2O)分解为燃料氢气(H_2)和副产物氧气(O_2)。另一个可能是太阳能驱动的二氧化碳光化学还原为一氧化碳(CO),可以用于合成燃料的制备。一种今天常见的光热转换技术是屋顶上的太阳能热水器。它为数百万家庭提供低于 100°C 的热水。

人们也开发了集成两种转换过程到同一个系统的更为复杂的技术。这在聚光太阳能系统中体现的更明显,他们采用镜子或者透镜把大面积的太阳光聚焦到一个很小的面积上。在这样的系统的焦点上,液体被加热到约 $1\,000^\circ\text{C}$ 。所产生的蒸汽可以用于驱动传统的汽轮发电机。从原理上讲,高温同样也可以用于进行热化学还原把 CO_2 转化为 CO 用于合成燃料。聚光太阳能电力系统需要跟踪太阳的追踪系统,并且必须被安装在干燥的对直射太阳光没有遮挡的气候环境下。

1.2 本书范围

上面所讨论的太阳能利用技术正处于成熟度不同的阶段。从产业化来看,今天最成功的技术可能是太阳能热水器。虽然它们技术上成熟而且经济上具有竞争力,但是它们并不能制造电力或者燃料。太阳能光伏组件和聚光太阳能系统与化石燃料和核裂变相比发电成本仍然偏高,但是它们已经在吉瓦级水平上得到了产业化应用。光化学转换和光电化学器件很大程度上仍然处于实验室开发的不同阶段。本书将聚焦于已经准备大规模产业化应用的技术,也就是说太阳能光伏。我们将应用太阳能光伏电池或者更简单的太阳电池这一术语来体现这项技术利用光

伏效应把太阳光转换为电力这一事实。

在作者心目中，到 21 世纪末太阳能将成为我们生活中能源的主要来源是没有疑问的。然而，在新的能源基础结构中光伏能够扮演多重要的角色呢？除了效率和成本之外，有没有其他的绊脚石和瓶颈阻碍太阳能光伏发挥其全部的潜力？正如图 1.1 所表明的那样，太阳能光伏需要达到数十太瓦峰值功率的规模，否则它将不会对我们未来能源体系产生显著的贡献。有许多绊脚石如果不被克服的话，采用现有产业化的太阳电池技术实现太瓦级应用将被阻止。此外，还有一些阻碍现有产业化太阳电池技术应用的瓶颈问题。

在本书中我们将更详细地讨论这其中的一些绊脚石和瓶颈问题。我们将分析由于原材料和电力有限的可获取性对太瓦级太阳能光伏的自然资源限制。我们也将解释太瓦级太阳能电力的存储和太瓦级废弃光伏组件回收问题中的绊脚石。本书也将给出太瓦级太阳电池技术的一些所需要的理想的特性，它们将为我们开发低成本、高效率的可实现太瓦级太阳电池技术的努力提供指导。为了实现太瓦级太阳能光伏的终极目标，本书将给出几个战略性的研究方向，这将涵盖太瓦级晶体硅太阳能光伏、太瓦级薄膜硅太阳能光伏和硅之后的太瓦级薄膜太阳能光伏。最后本书将提出一个可持续的太阳能电力存储和输运的能量循环，它将可以实现太阳能的按需输送和使用。

对于太阳能光伏的未来来说，本书中的分析第一眼看上去可能有些令人失望。作者的目的是为了不让读者失望，而是为了量化挑战，无论它看上去有多令人望而生畏。更重要的是，作者希望大家意识到这一巨大的挑战给科学家和工程师带来的机会有多大。对希望自己的研究能产生长期持久影响力的所有人来说，这是一生中只有一次的机会。这也是我们对文明、地球以及我们孩子的责任。

参考文献

1. Hoffert MI, Caldeira K, Jain AK, Haites EF, Harvey LDD, Potter SD, Schlesinger ME, Schneider SH, Watts RG, Wigley TML, Wuebbles DJ (1998) Energy implications of future stabilization of atmospheric CO₂ content. *Nature* 395:881–884
2. Wigley TML, Richels R, Edmonds JA (1996) Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentration. *Nature* 379:240–243
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) Climate change 2007—the physical science basis. Cambridge University Press, Cambridge
4. U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration, Trends in atmospheric carbon dioxide. Available at <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
5. Mitchell JFB (1989) The ‘greenhouse’ effect and climate change. *Rev Geophys* 27:115–139
6. U.S. National Aeronautics and Space Administration, GISS surface temperature analysis. Available at <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>
7. Lewis NS (2007) Powering the planet. *MRS Bull* 32:808–820
8. U.S. Department of Energy (2005) Basic research needs for solar energy utilization. Available at http://science.energy.gov/~media/bes/pdf/reports/files/seu_rpt.pdf
9. U.S. National Renewable Energy Laboratory, Reference solar spectral irradiance—air mass 1.5. Available at <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>

第2章 太阳能光伏现状

在讨论太阳能光伏的技术之前，我们先综述一下它的现状。这一章将从综述现有太阳电池技术及其效率开始。随后是关于太阳能光伏大规模应用众所周知的障碍即太阳电池成本的讨论。第三部分将讨论太阳能光伏的市场，包括年度和累计的安装量，不同电池技术的市场份额以及它们的历史趋势。本章将有一个充满希望的结束，即采用光伏技术利用太阳能的潜力和需要填补的空隙都是巨大的。

2.1 转换效率

光伏的概念是指光生电压。它是由法国物理学家 Becquerel 在 1839 年发现的^[1]。他的实验采用了一个酸性溶液中以氯化银 (AgCl) 电极和铂 (Pt) 电极构成的电化学池。当光照射在 AgCl 电极上的时候，两个电极之间观察到了一个电压。美国发明家 Fritts^[2] 在 1883 年展示了一个全固态的光伏器件。他在半导体硒 (Se) 上沉积了一层超薄的对入射光透明的金 (Au)。这个器件的能量转换效率小于 1%。采用半导体 p-n 结的现代太阳电池是在 1946 年由贝尔实验室的 Ohl^[3] 发明。贝尔实验室的 Chapin 等人^[4] 在 1954 年展示了第一个现代的硅太阳电池。他们的电池采用了一个单晶的硅片，在 n 型硅片上形成了一个 $2.5\mu\text{m}$ 的 p 层，其转换效率大约为 6%。虽然现代的硅太阳电池已经达到了 25% 的效率^[5]，但是在几个关键的方面它们仍类似于第一个硅电池，也就是说，它们都采用单晶或者多晶的硅片进行太阳光吸收，以及它们都采用 p-n 结进行电荷分离。

自从 1954 年的第一块晶体硅太阳电池发明之后，太阳电池领域取得了持续不断的进步。图 2.1 给出了 2013 年美国国家可再生能源实验室 (NREL) 编辑的不同太阳电池技术在过去 37 年以来最好实验室效率的变化。太阳电池的能量转换效率 η ，是指最大的电力输出与入射太阳光能量之间的比值：

$$\eta(\%) = \text{最大电力输出} / \text{入射太阳光能量}$$

图 2.1 中不同的产业化的太阳电池技术包括：

- 1) 晶体硅太阳电池，单晶或者多晶；
- 2) 薄膜碲化镉 (CdTe) 太阳电池；
- 3) 薄膜硅太阳电池，非晶或者微晶；