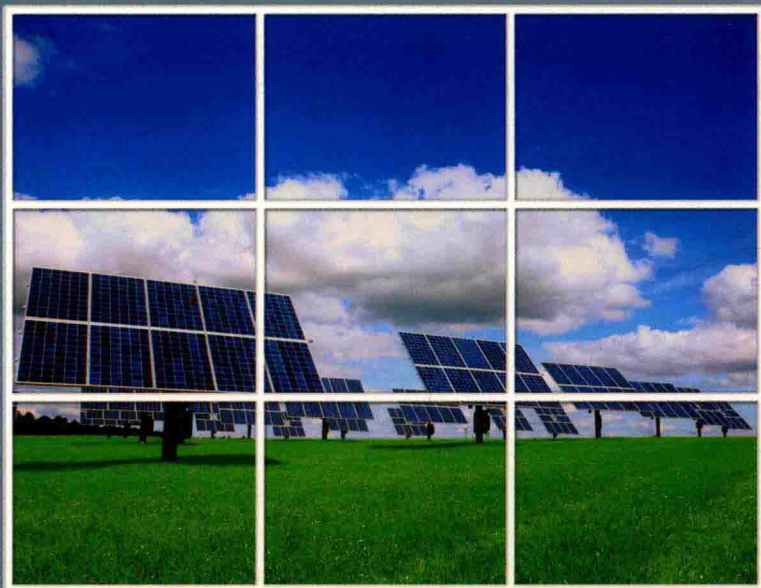


| 新能源科技译丛 |

低成本太阳能发电

(美) 刘易斯·M. 弗拉斯 著
张玉霞 邢文龙 译



中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

新能源科技译丛

低成本太阳能发电

(美) 刘易斯·M. 弗拉斯 著

张玉霞 邢文龙 译

中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

低成本太阳能发电 / (美) 刘易斯·M. 弗拉斯 (Lewis Fraas) 著; 张玉霞, 邢文龙译. —北京: 中国三峡出版社, 2016. 7

书名原文: Low-Cost Solar Electric Power

ISBN 978 - 7 - 80223 - 940 - 1

I. ①低… II. ①刘…②张…③邢… III. ①太阳能发电 - 研究 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 247395 号

Translation from the English language edition:

Low-Cost Solar Electric Power

by Lewis M. Fraas

Copyright © Springer International Publishing Switzerland 2014

Springer is part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

北京市版权局著作权合同登记图字: 01 - 2016 - 4972 号

中国三峡出版社出版发行

(北京市西城区西廊下胡同 51 号 100034)

电话: (010) 66117828 66112788

<http://www.zgsxcbs.cn>

E-mail: sanxiaz@sina.com

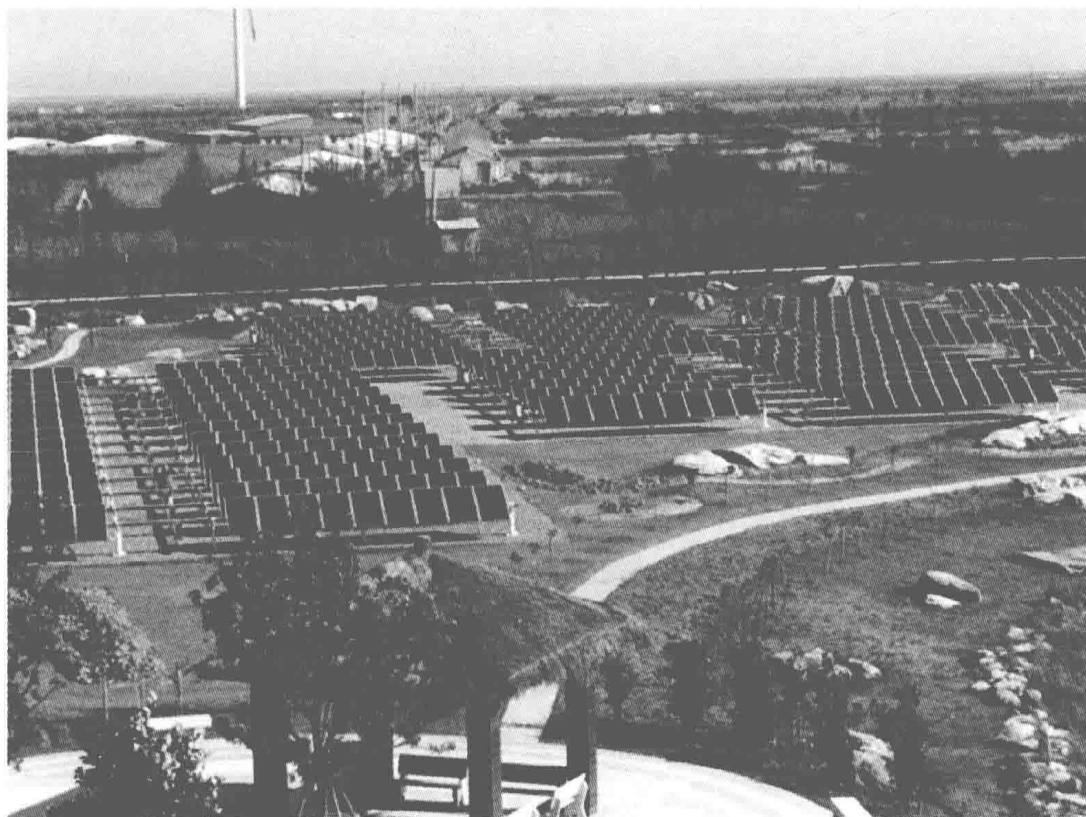
北京市十月印刷有限公司印刷 新华书店经销

2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 11.875 字数: 250 千字

ISBN 978 - 7 - 80223 - 940 - 1 定价: 52.00 元

内 容 提 要



这张图片是作者供职的公司于2008年在中国上海附近设计并安装的太阳能电池板，功率为300 kW。截至2013年底，世界最大的在用太阳能集热场功率达到300 MW，是2008年建造的电池板的1000倍。预计到2018年，全球将有多个功率达吉瓦级的大型太阳能集热场。

序

本书主要介绍了最新的太阳能电池技术，由 Lewis Fraas 博士编著，为读者了解太阳能电池发展现状提供了丰富资料，同时也对太阳能电池未来的发展趋势进行了分析。Fraas 博士从事太阳能领域的研究多年，取得了丰硕的成果，曾经参与解决了多项技术难题。本书以此为基础进行编写，也阐述了 Fraas 博士对太阳能未来发展趋势的预测和见解。

第一章简要总结了太阳能电池发展 175 多年的历史，从科学家第一次观察到光伏效应开始，一直到现代将太阳能转化为电能的商品化模式。作者详细介绍了近 200 年来太阳能领域的所有关键科学理论和技术发展情况，以及发展中遇到的技术瓶颈和难题。

第二章介绍了太阳能电池市场从 21 世纪初到现在的巨大发展。当前，太阳能电池已成为经济、实惠的大规模供电方式，不仅有助于解决能源短缺问题，也可以应对全球变暖和空气污染等相关问题。

第三章中，作者展示了自己对太阳能电池技术这一复杂领域研究的独到之处。他向读者解释了太阳能电池为什么会有现在的发展，以及未来的发展的机会，其中包括许多当前被忽视的问题。

第四章中，作者对半导体量子力学进行了介绍，这是我迄今为止所见过的最有说服力、最准确的描述，而且没有采用纯数学性的表述，可以让没有深厚理论和物理知识背景的人更容易理解深层的科学概念。

第五章是最精彩的一章。在这一章中，作者详细讲述了中国太阳能产业市场的计划投资对日本和美国的自由市场式太阳能电池行业的影响，而这一时期的德国太阳能电池行业仅处于勉强维持的状态。这是对人造卫星、先锋太空火箭和卫星发展历程的重新审视。中国迎头赶上的不是美国的自由市场体制，而

低成本太阳能发电

是远超美国军方的发展计划和大量投资。最终，自由市场体制在 2014 年胜出，商业太空火箭变为最实际的解决方式，并很快占据主导。然而，第一颗人造卫星是在 1957 年发射的。可以想象自由市场体制在美国最终获胜前的 60 年期间面临的军事风险。

如果不考虑全球变暖和污染因素，单从美国甚至全球在能源战略、能源安全和能源独立等方面的当前利益出发，需要确保计划的早期投资远远超出自由市场体系最初可产生的利润，尤其是在最终结果可以成为经济竞争力的情况下，更应当确保其切实实施。许多以美国为首的技术创新，主要得益于军队或者美国国家航空航天局的资助，比如商用喷气飞机、电子集成电路、互联网、卫星，以及人类登月计划，美国州际公路系统等基础设施更是此类投资的典范。

第六章简明叙述了薄膜太阳能电池研究的进展。碲化镉薄膜太阳能电池是将太阳能组件价格降至 2 美元/瓦特以下的主要“功臣”，但存在的问题是这种组件的固有的有限的效率。

第七章对聚光太阳能电池系统的优点进行了详细的介绍。

第八章是作者针对效率为 40% 的太阳能电池发展的个人见解和精彩介绍。

第九章是对太阳能光伏大规模发电的介绍，其中关于汽车连接到电网（V2G）存储技术发展潜力的介绍，非常精彩，令人耳目一新。这一技术将太阳能和风能结合，真正意义上取代了煤、石油、天然气，甚至核能这些公共发电方式。

第十章介绍了如何通过聚光系统提供照明和发电，这一技术的前景非常广阔，应予以关注。

第十一章对我本人具有重要意义，通过这一章的描述，我开始理解一些关于热光伏的重要因素和潜在优势。

第十二章是前瞻性介绍，解释了很多关于如何在太空中安置太阳能反射镜的细节性内容，这些技术可以大大降低未来太阳能发电的成本。

Larry Partain
Los Altos, 加利福尼亚

前 言

1973 年，阿拉伯对西方资本主义国家实行了石油禁运，这是美国遭受的第一次能源冲击。该事件促使福特总统（Gerald Ford）开始推行支持美国能源独立的政府资助计划。卡特总统（Jimmy Carter）也延续了对这一计划的支持态度，但他更侧重于发展风能等可再生的无污染能源。1975 年，国际太阳能技术中心在美国加利福尼亚州成立，并将原本应用于太空行业的硅太阳能电池引入地面设备。

太阳能电池是将阳光直接转换成电能，而电能是最有价值的一种能量形式。太阳能电池有两个突出优点：

- 没有需要移动的部件，半导体设备几乎不需要维修。
- 没有燃料消耗，几乎对环境没有影响。

1980 年，国际太阳能技术中心首次研制出功率为 1 MW 的地面太阳能电池。然而令人遗憾的是，同年，里根总统（Ronald Reagan）下令拆除当年卡特总统任职期间安装在白宫的太阳能电池板。同时，里根总统在美国推行了新的能源政策，并声明美国将为捍卫中东石油的进口权采取必要的军事行动。第一次中东石油战争随着伊拉克入侵科威特，在 1991 年最终爆发。

同时，德国、日本和美国发起了联合房主为离网和联网应用购买地面太阳能组件的绿色行动。截至 1999 年，全球在运行的地面太阳能组件共产生 1 GW 的电能；到 2012 年底，全世界各地包括大型公用事业中心发电站在内的所有太阳能电池共产生 100 GW 的太阳能电力。我们现在正处在太阳能变革的时期。本书第一章讲述了太阳能电池的演化历程，不仅介绍了太阳能电池和组件研究革新的科学史，还介绍了不同政府在不同时期的政策和经济投资对其发展的重要作用。

低成本太阳能发电

第二章通过讨论认为在未来5~10年内,石油产量可能达到峰值,天然气行业泡沫也可能破灭,进一步强调了发展可再生能源的重要性。气候变化明显,冰川消融,超级风暴和台风海燕等环境影响剧烈。煤炭污染从北京和上海的雾霾照片中就可见一斑。

第三章和第四章介绍了太阳能电池技术的发展。第三章主要讨论了不同类型的太阳能电池、组件和系统,以及目前的产业状况。第四章主要描述了太阳能电池的工作原理,并强调了单晶半导体对实现高电池效率的重要性。

晶体硅(c-Si)太阳能组件在当今太阳能电池技术市场上占主导地位,其核心技术在第五章中进行了详细介绍。晶体硅系统的安装价格已经降到2.5美元/瓦特,而且还在持续下跌。当前的一系列技术方法会继续推动成本的下降。

三十多年来,我一直有个梦想,希望非晶硅薄膜太阳能电池技术可以进一步降低家用和公用太阳能系统的安装价格。但遗憾的是,由于第四章介绍的部分科学性的原因,这一梦想至今还没能变成现实,其中的主要原因是非晶硅薄膜太阳能电池自身转化效率的限制。尽管如此,这一领域已经取得了巨大的成就。比如,我一直使用的光动能手表以及由非晶硅光伏电池供电的计算器,就是典型的代表。另外,非晶硅半导体设备的应用也取得了可喜的发展,典型代表为用于液晶显示器的大面积场效应晶体管驱动电路。我们使用的iPad、手机、平板、电视以及电脑屏幕都在使用这些显示器。第六章对相关技术做了详细介绍,这是太阳能电池和显示器相互作用的典型案例。

本书的第一章至第六章主要讲述了太阳能电池革命的大趋势,后半部分则主要介绍了太阳能电池的技术可行性,但需要政策和经济的全面支持。一种方法是利用聚光系统降低公用太阳能系统的成本。这一理念若用镜子、塑料或者玻璃镜片等也具有同样聚光面积,但使用成本更低的光学元件替代单晶电池,可进一步降低太阳能电池的成本。这种聚光光伏技术有两种形式,一种是使用效率为24%的硅电池低聚光光伏,另一种是使用效率为44%的高效多结电池的高聚光光伏。具体内容见第七章。SunPower公司在低聚光光伏概念的发展上取得了显著成果,近期刚发布了一个70 MW太阳能电力的订单。第八章则从作者角度讲述了效率为40%的高效多结太阳能电池的发展历史。

第一章和第二章提到了主要职权部门、可再生能源倡导者以及反对派之间针对石油、天然气、煤、核能等主要能源由来已久的争论。主要职权部门在美

国的影响力从 2003 年第二次伊拉克战争中就可见一斑。但遗憾的是，美国在 2005 年失去了在晶体硅光伏领域的主导地位，中国则取而代之，成了该行业新的领头羊。职权部门认为可再生能源过于昂贵，并对此强加指责。本书的前八章的目的旨在证明这种指责毫无根据。

主要职权部门将指责的矛头转向了太阳能和风能的间歇性。这一问题完全可以通过能量存储加以解决，而且目前相关解决措施已经在实施中。然而，还有一个正在兴起的产业对太阳能的发展起到了潜在的推动作用，即引入电动车代替汽油车作为通勤工具。假设每天上下班开车 2 小时，剩下的 22 个小时可以将其放置在公司停车场或者家里的车库里，在公司可以利用太阳能或者风能给电池充电，而后这些电池还可用于夜间家庭供电。具体见第九章。

尽管美国失去了光伏制造市场的主导地位，中国取而代之占据首位，但美国和欧洲仍在不断地创新。第十章和第十一章介绍了光伏电池的多种混合应用。比如，红外敏感光伏电池或者热光伏电池可以用来将红外线热能从发光物体转换成电能的热电联产应用中。天然气加热家用炉中发光的陶瓷元件可用于寒冷天气里供热和供电，其转化效率为 90%。另外，这些红外光伏电池可以捕获钢厂发锈钢坯产生的热辐射，进而用于发电，减少中国的煤炭燃烧排量。

第十二章介绍了太阳能极具潜力的发展动向。这一应用是介于两大潜在变革之间另一潜在趋势，具有良好的利润前景。太阳能面临的一个挑战是，受日照时长的限制。几十年来，太阳能行业一直梦想着通过太阳能发电卫星（SPS），实现 24 小时全天候的太阳能供电。然而，太阳能发电卫星的概念非常复杂，因为其有多个能量转化步骤，还包括要专门建造地面微波接收站。第十二章中介绍了一种替代性解决方案，该方法是在高度为 1000 km 的太阳同步轨道上安装直径为 10 km 的反射镜阵列，在黎明和黄昏时将阳光反射回地面太阳能发电场，这样就可以在早晨和夜间提供额外 3 小时的电力。关键是，现在世界各地正在兴建越来越大的地面太阳能场、光伏或槽式聚光太阳能发电场。通过反射镜阵列将阳光反射回地面是一个相对简单的概念。可以将这两种技术进行有机结合，比如，以更低的成本进入太空，以及建设更大型的太阳能电场。如果这一概念在未来能够得以实现，世界各地阳光充足的光伏场所产生的电力生成时间有可能增加到每天 14 个小时，使太阳能场容量系数增加 58%，可再生无污染的太阳能电力的成本下降到 6 美分/千瓦时以下。

低成本太阳能发电

本书的后半部分主要介绍了一些本行业内令人兴奋的发展潜力，但关键问题是如何为实现这些想法进行融资。金融界倾向于赞成职权部门提出的维持能源技术现状的观点（如最近提出的“压裂”理念）。希望本书的读者能够关注本书中提出的新理念，投以政治意愿和投资意向，助其早日投入实施，为了和平、美好而又充满阳光的能源未来努力！

Lewis M. Fraas 博士

2014 年 3 月

目 录

第一章 太阳能电池发展历程	(1)
1.1 发现光伏效应	(1)
1.2 理论基础的形成	(1)
1.3 第一块单晶硅太阳能电池	(2)
1.4 美国对光伏发展的大力扶持和新光伏设备的发展	(2)
1.5 美国放弃可再生能源和能源独立政策	(4)
1.6 国际支持和低成本批量生产	(7)
第二章 太阳能光伏市场发展现状和对无污染太阳能的需求	(12)
2.1 烃燃料时代	(13)
2.2 石油峰值	(14)
2.3 全球变暖	(15)
2.4 有关太阳能的争论	(17)
2.4.1 原因1：太阳能发电成本较低	(20)
2.4.2 原因2：油价和天然气价格上升	(20)
2.4.3 原因3：战争、大规模杀伤武器以及太阳能的道德论据	(20)
2.5 太阳能光伏电池及其市场	(22)
2.6 太阳能光伏经济	(23)
2.7 光伏技术发展的未来前景	(26)
第三章 光伏电池的种类	(29)
3.1 前言	(29)
3.2 太阳能电池和组件的种类	(32)
3.3 实现大批量生产的电池	(33)
3.4 高效太阳能电池及其未来前景	(37)

低成本太阳能发电

3.5 小结 (40)

第四章 光伏电池的基本原理以及单晶体的重要性 (44)

4.1 原子中的电子波动性以及元素周期表 (44)

4.2 半导体晶体 (46)

4.3 PN 结与二极管 (48)

4.4 太阳能电池能带图以及功率曲线 (50)

4.5 高效多结太阳能电池 (51)

4.6 太阳能电池的种类及交易成本 (54)

4.7 单晶体的重要性 (56)

第五章 如今的地面用硅太阳能电池 (59)

第六章 薄膜光伏电池的伟大梦想 (69)

第七章 聚光太阳能电池系统简介 (77)

7.1 概述 (77)

7.2 为什么要跟踪太阳? (78)

7.3 单轴跟踪系统 (81)

7.4 双轴跟踪系统 (83)

7.5 太空太阳跟踪革新概念 (85)

7.6 小结 (90)

第八章 效率高达 40% 的多结太阳能电池的发展历程 (93)

8.1 概述 (93)

8.2 我眼中的多结或多色太阳能电池发展史 (93)

8.3 续写历史: 外延式和单片式多结电池 (97)

8.4 续写历史: 新型红外光敏 GaSb 电池和效率 35%
的 GaAs/GaSb 叠层电池 (99)

8.5 针对不同用途的不同设计 (103)

8.6 聚光组件发展动态: 德国和日本开始把多色电池引入地面应用 ... (108)

8.7 聚光组件发展动态: 卡塞格伦式光伏组件 (109)

8.8 小结 (110)

第九章 太阳能光伏技术在电力领域的新发展 (112)

9.1 电力燃料 (112)

9.2	太阳能发电性价比更高	(113)
9.3	能源的间歇性与储能	(114)
9.4	车辆到电网	(117)
9.5	车辆到电网概念	(119)
9.6	车辆到电网技术在加州的发展机遇	(119)
第十章	红外光伏技术在室内太阳能光电联供方面的应用	(124)
10.1	管送聚光用于室内照明的概念	(124)
10.2	橡树岭国家实验室研究团队	(125)
10.3	ORNL 概念与经济潜力	(126)
10.4	ORNL 演示样机	(129)
10.5	红外光伏阵列的设计、制备与性能	(129)
第十一章	基于红外热敏电池的热光伏技术	(132)
11.1	热光伏概念	(132)
11.2	热光伏历史背景	(133)
11.3	热光伏关键部件和要求	(134)
11.4	热光伏应用	(135)
11.5	Midnight Sun TM 牌热光伏炉	(136)
11.6	轻型热光伏电池替换	(139)
11.7	便携式热光伏系统电池概念	(139)
11.8	热光伏的工业用途	(148)
11.9	单一电池性能展示	(153)
11.10	小结	(154)
第十二章	地面光伏电站用空间太阳光反射镜	(156)
12.1	引言	(156)
12.2	反射镜阵列卫星组相关概念	(158)
12.3	世界各地的地面太阳能发电站	(161)
12.4	会影响全球变暖吗?	(162)
12.5	反射镜卫星设计	(163)
12.6	经济性	(166)
12.7	反射镜卫星组发展路线图	(166)

低成本太阳能发电

12.8 小结 (169)

附件 与表 12.1 和全球变暖有关的运算 (171)

作者简介 (173)

低成本太阳能发电 (174)

第一章 太阳能电池发展历程

1839 年，法国科学家 Alexandre Edmond Becquerel 首次观察发现一种浸泡在导电溶液中的电极在光照下产生光生伏特（PV）效应。至今已有 175 年的历史^[1]。从总的发展情况来看，这一发现对此后光伏电池的发展具有重要的指导意义^[2]。

1.1 发现光伏效应

光伏太阳能 175 年的发展历史可以划分为 6 个阶段，1839—1904 年为光伏太阳能的发现阶段。表 1.1 列出了第一阶段最具代表性的事件。1877 年，Adams 和 Day 研究了硒（Selenium）光伏效应^[3]，1904 年 Hallwachs 用铜与氧化亚铜研制了半导体太阳能电池。然而，这一时期仅仅是光伏发现的初期阶段，对于为何会产生这种现象人们无从得知。

表 1.1 1800—1904 年：发现光伏效应

1839 年：Alexandre Edmond Becquerel 首次观察到光线照入导电溶液内产生电流的光伏特（PV）效应 ^[1] 。
1877 年：W. G. Adams 和 R. E. Day 在硒（Se）晶体中观察到光伏效应，并且发表了一篇有关硒太阳能电池的论文 ^[3] 。“The action of light on selenium”，见 “Proceedings of the Royal Society”，A25, 113。
1883 年：Charles Fritts 在硒表面镀上一层薄薄的金，制成了太阳能电池，但其最高效率只有不到 1%。
1904 年：Wilhelm Hallwachs 研制了一个半导体太阳能电池（利用铜与氧化亚铜）。

1.2 理论基础的形成

1905—1950 年为光伏设备的发展和进一步完善奠定了理论基础。表 1.2 列出了这一时期发生的与光伏相关的事件，主要包括：爱因斯坦提出了“光量子论”^[4]，波兰科学家 Czochralski 提出并发展了生长单晶硅的提拉法工艺^[5]，另外，高纯度单晶半导体能带理论得以发展^[6,7]。高效能、高纯度单晶半导体太阳能电池对光伏电池理论的发展具有重要意义，本书第四章对这一理论基础进行了介绍。本阶段的发

低成本太阳能发电

展为下一阶段奠定了良好基础。

表 1.2 1905—1950 年：理论基础的形成

1905 年：Albert Einstein 在普朗克量子概念的基础上提出了光电效应 ^[4] 。
1918 年：波兰科学家 Jan Czochralski 建立了生长单晶硅的提拉法工艺。数十年后，这一方法被应用于单晶硅生产。
1928 年：F. Bloch 基于单晶周期性晶格排列提出了能带理论 ^[5] 。
1931 年：A. H. Wilson 提出了高纯度的半导体相关理论 ^[6] 。
1948 年：Gordon Teal 和 John Little 利用 Czochralski 的晶体生长方法研制出了单晶锗，随后研制出了单晶硅 ^[7] 。

1.3 第一块单晶硅太阳能电池

表 1.3 列出了 1950—1959 年期间单晶硅光伏设备的发展和应用情况。这一时期的重要事件包括：1954 年 Pearson 和 Chapin 在贝尔实验室制成第一块单晶硅太阳能电池^[8]。1957 年 Fuller 研制了效率为 8% 的硅太阳能电池并获得专利^[9]。上述进步和发展为光伏市场的多样性奠定了基础，具体见第二章和第三章内容。

表 1.3 1950—1959 年：实用设备首次演示

1950 年：贝尔实验室研制出太空用太阳能电池。
1953 年：Gerald Pearson 开始研究锂—硅光伏电池。
1954 年：贝尔实验室宣布发明出第一块现代硅太阳能电池 ^[8] 。电池效率为 6% 左右。《纽约时报》报道称，太阳能电池未来将成为主要能源供应方式。
1955 年：美国西电股份有限公司（Western Electric）开始出售硅光伏技术商业专利。Hoffman 电子推出效率为 2% 的商业太阳能电池产品，电池售价为 25 美元/块，相当于 1785 美元/瓦特。
1957 年：AT&T 出让入（Gerald L. Pearson、Daryl M. Chapin 和 Calvin S. Fuller）获得了“太阳能转换装置”专利权 ^[9] ，专利号为 US2780765。他们将其称为“太阳能电池”。Hoffman 电子的单晶硅电池效率达到 8%。
1958 年：美国信号部队实验室的 T. Mandelkorn 制成 n/p 型单晶硅光伏电池，这种电池抗辐射能力强，更适合太空使用。Hoffman 电子的单晶硅电池效率达到 9%。美国发射的先锋 1 号卫星首次运用太阳能电池，光伏电池总面积 100 cm ² ，功率 0.1 W。
1959：Hoffman 电子实现可商业化单晶硅电池效率达到 10%，并通过使用网栅电极显著降低了光伏电池串联电阻。

1.4 美国对光伏发展的大力扶持和新光伏设备的发展

光伏发展的后 3 个阶段可以根据政治环境的变化进行划分。1960—1980 年是光伏发展的第四个阶段，这一阶段光伏太阳能电池应用获得了美国政府的大力支持。光伏太阳能电池首次应用于太空卫星，随后也开始在陆地设施中得以应用。表 1.4

列出了这一时期的重要事件。

表 1.4 1960—1980 年：美国政府大力扶持新型光伏设备

1960 年：Hoffman 电子实现单晶硅电池效率达到 14%。
1961 年：联合国召开“发展中国家太阳能发展”会议。
1962 年：Telstar 通信卫星使用太阳能电池 ^[10] 。
1967 年：联合一号是第一个由太阳能电池供电的人造飞船。
1970 年：苏联的 Zhores Alferov 及其团队研制出第一块半导体异质结高效太阳能电池 ^[12] 。
1971 年：礼炮一号空间站采用太阳能电池供电。
1972 年：IBM 的 Hovel 和 Woodall 研制出效率为 18% ~ 20% 的太阳能电池 ^[13] 。
1973 年：天空实验室 (Skylab) 采用太阳能供电。
1975 年：喷气推进实验室 (JPL) 的平板硅晶组件首次从太空应用过渡到地面应用。
1976 年：RCA 实验室的 David Carlson 和 Christopher Wronski 首次研制出世界上第一块非晶硅光伏电池，其效率为 1.1% ^[16] 。
1977 年：太阳能研究所在科罗拉多戈尔登成立。
1977 年：卡特总统在白宫安装太阳能板，积极推动太阳能系统发展。
1977 年：全球光伏电池产能超过 500 kW。
1978 年：第一个非晶硅太阳能电池供电计算器 ^[17] 诞生。
1970 年后期：出现“能源危机” ^[11] ；太阳能应用引起社会广泛关注，尤其是光伏太阳能、主动式太阳能以及被动式太阳能在艺术建筑、未接入电网的建筑物和家庭中的应用。
1978 年：L. Fraas 和 R. Knechtli 介绍了 InGaP/GaInAs/Ge 三结叠层太阳能电池（300 个太阳）的概念，提出该电池在设定条件下的效率可达 40% ^[14] 。
1978 年：美国出台并通过《公共事业管制政策法案》(PURPA) ^[18] 。

这一阶段开始的标志性事件是 1962 年成功发射的第一颗通信卫星 (Telstar)^[10] (图 1.1a) 并使用了硅太阳能电池供电。到 20 世纪 70 年代，硅电池开始应用于地面装置。图 1.1b 展示了一个典型的现代地面硅太阳能电池。本书作者从 1973 年开始从事太阳能领域的研究，在这一年还发生另外两件大事，一是阿拉伯石油禁运事件^[11]，另一个是美国第一条输气管道建成。

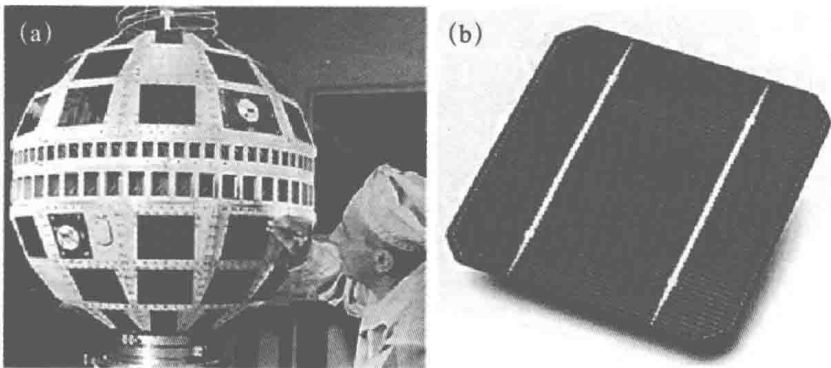


图 1.1 a Telstar 卫星^[10] b. 一种典型的硅太阳能电池/光伏电池^[1]