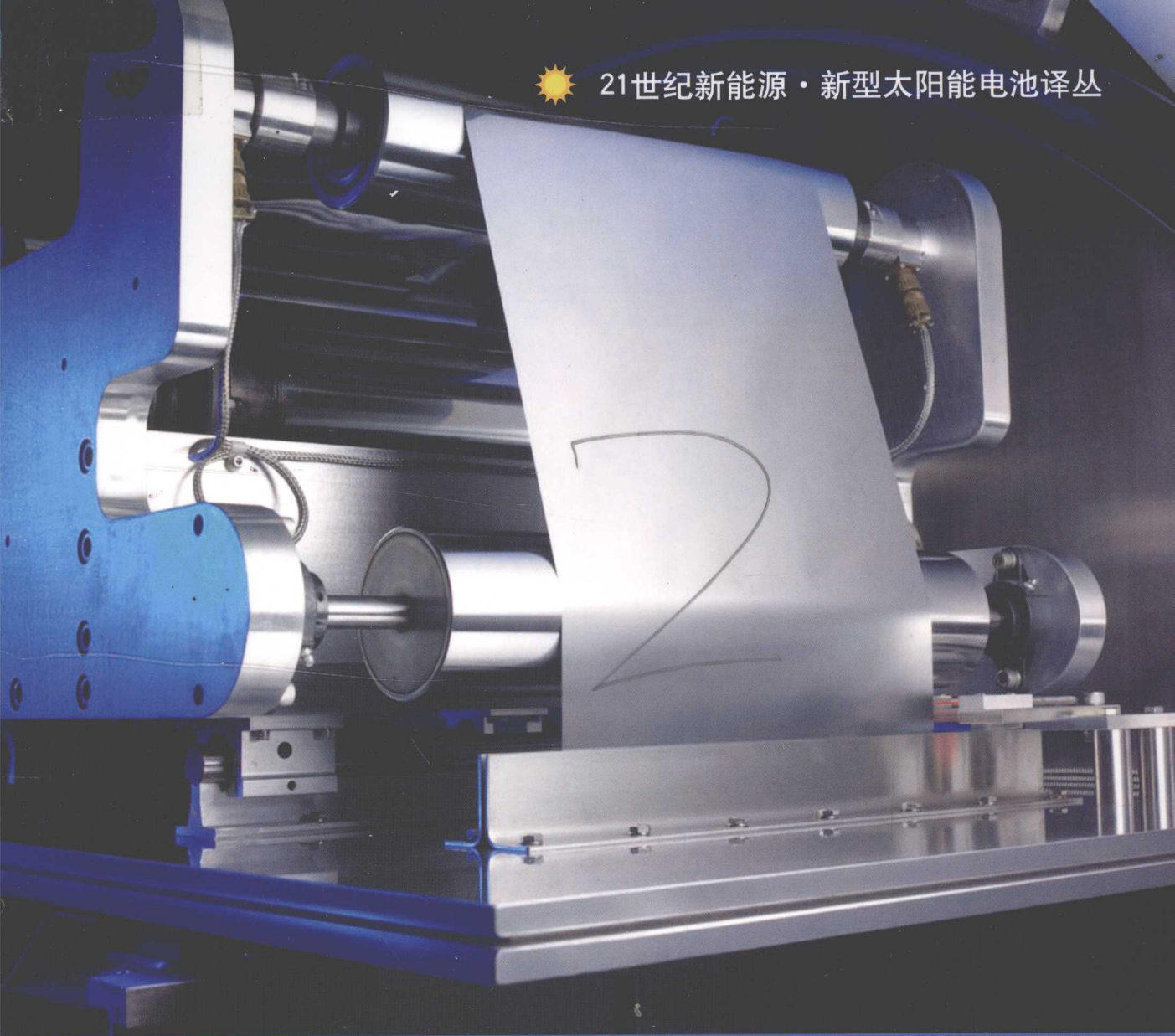


☀ 21世纪新能源·新型太阳能电池译丛



柔性太阳能电池

Flexible Solar Cells

Mario Pagliaro
【意】 Giovanni Palmisano 著
Rosaria Ciriminna

高扬 译



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

21 世纪新能源·新型太阳能电池译丛

柔性太阳能电池

[意] Mario Pagliaro 著
Giovanni Palmisano
Rosaria Ciriminna

高 扬 译

上海交通大学出版社

内 容 提 要

进入 21 世纪,随着人们对全球气候变暖问题的关注,太阳能产业在世界各国蓬勃地发展起来。作为全球最大的太阳能电池生产国,中国不但希望为世界提供更加廉价的太阳能电池,更加希望提升太阳能电池生产的技术含量,进一步实现经济增长方式的转变。柔性太阳能电池是世界太阳能产业的新兴技术,本书将为读者介绍各种类型柔性太阳能电池的原理概念、基本工艺和市场应用。本书的特点是篇幅内容简练、图片数据丰富、行业信息详实。除了柔性太阳能电池,本书还简要地介绍了薄膜太阳能电池、第三代太阳能电池等新型太阳能电池。

本书是一本入门级的参考书,适合在校师生、工程技术人员、风险投资人士或其他对太阳能感兴趣的读者阅读。

Originally published in the English language by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstrasse 12, D-69469 Weinheim, Federal Republic of Germany, under the title "Flexible Solar Cells". Copyright 2008 by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
著作权合同登记号:图字 09-2009-574

图书在版编目(CIP)数据

柔性太阳能电池/(意)帕格利亚诺(Pagliaro. M.)等著;高扬译. —上海:上海交通大学出版社,2010
(21 世纪新能源·太阳能实用技术译丛)
ISBN 978-7-313-06058-7

I. 柔... II. ①帕... ②高... III. 太阳能电池 IV. TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 192075 号

柔性太阳能电池

[意] Mario Pagliaro 著
Giovanni Palmisano
Rosaria Ciriminna

高 扬 译

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海交大印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:11.25 字数:273 千字

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

印数:1~3030

ISBN 978-7-313-06058-7/TM 定价:24.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

近年来,世界各国的民众都能体会到,全球气候变暖对环境带来的变化。2007年7月,南欧各国甚至经历了 50°C 的高温。很多国家也度过了一个又一个的暖冬。因此,我们有必要控制 CO_2 的排放,最好的方式就是大规模地发展太阳能、风能、电动汽车和节能照明等方面的新能源产业。很多人认为,新能源产业是IT产业之后21世纪最重要的高科技领域。

受到一定社会关注和资本市场追捧的太阳能产业,仍然有两项重要而艰难的任务:

(1) 提高太阳能电池的转换效率,从现在的 $17\%\sim 22\%$ 提高到 50% 以上,使太阳能光伏发电有更广阔的应用前景。

(2) 降低太阳能电池的成本,使安装成本低于火电,实现所谓的平价上网。希望太阳能经济进入一个不需要政府补贴的新时代,使之从政策扶持的产业逐渐转变成完全市场驱动的产业。降低太阳能电池的成本,还可以在更多的发展中国家实现农村电气化(参见2.5节)。

柔性太阳能电池(flexible solar cell),是第二代薄膜太阳能电池的一个重要类型,虽然转化效率仍然有待提高,但是卷对卷工艺具有鲜明的成本优势。称之为“柔性”太阳能电池,是因为其衬底是塑料片或者金属箔片,有别于其他玻璃衬底的薄膜太阳能电池。其特点是重量轻、可弯曲,适合集成在各种弯曲物体的表面,如光伏建筑一体化、帐篷、箱包、服装、汽车、帆船等。柔性太阳能电池的研究是一门交叉学科,涉及到物理、化学、材料、机械等科学领域,也离不开过去20年纳米技术的进步。

目前,已有数家欧美初创企业,成功研发出适合大规模生产的柔性太阳能电池产品,并得到了优质的股权投资。受到谷歌(Google)投资的CIGS柔性太阳能电池公司Nanosolar,在2009年9月宣布Utility Panel™获得了TUV认证(参见第3章)。有机柔性太阳能电池公司Konarka,也得到石油公司雪佛龙(Chevron)的风险投资(参见第4章)。

《柔性太阳能电池》的内容涵盖了各种类型柔性太阳能电池的理论、结构、工艺、产品和市场。其中,有机柔性太阳能电池、染料敏化太阳能电池和第三代太阳能电池相关章节的论述,体现了原作者化学背景的优势。在科技界,中国人总被认为理论功底好,但是创造力不足,本书囊获了很多新型太阳能电池的概念,以飨国内读者。本书的文字篇幅尽量简练,图片数据尽量丰富,产业信息尽量详实,使读者能够最大限度、并且最快速地对柔性太阳能电池及其他新型太阳能电池有一个直观的认识。

一般认为,理工科的专业素养(professional capability)包括技巧(skill)和知识(knowledge)。技巧分为计算模拟水平和实验生产经验,而知识分为行业概念和常用参数。技巧需要熟能生巧,而知识需要准确记忆。《柔性太阳能电池》的特色在于较广泛的知识面,所以建议学生读者重视书中带括号的英文注释和书后的索引,它们都是重要的行业概念,通过英汉对照的学习可以加深对这些行业概念的理解和印象,并为阅读英文文献打下基础。由于篇幅有限,不能对每一个概念进行充分展开,学生读者可以通过网络对感兴趣的概念,进一步地搜索和学习。本书没有习题。但是,如果学生读者在阅读完本书后,遮住索引的英文列或中文列,可以说出或写出另一列,并且能够回忆得起相应概念的含义,那么说明已经充分地掌握了

相关的知识。

《柔性太阳能电池》可以作为一本入门级参考书,适合物理系、动力与能源系、材料系、化学系或其他相关专业的本科生、研究生和教师了解柔性太阳能电池技术。本书也可以作为太阳能企业的工程师、新能源方向的风险投资人、做政策决策的政府官员以及其他对太阳能产业感兴趣的读者认识最新技术发展方向。

目 录

1 柔性太阳能电池和太阳能产业	1
1.1 柔性太阳能电池	1
1.2 太阳能产业	5
1.3 太阳能电池的三次技术革新浪潮	7
1.4 光伏建筑一体化	9
1.5 “新概念”电池孵化的太阳能高科技企业	15
参考文献	22
2 太阳能电池原理	23
2.1 概论	23
2.2 伏安特性曲线	29
2.3 转换效率的极限	34
2.4 叠层太阳能电池	36
2.5 太阳能电池的应用	38
2.6 太阳能研究简史	42
参考文献	45
3 无机柔性太阳能电池	46
3.1 概论	46
3.2 非晶硅柔性电池	51
3.3 铜铟镓硒柔性电池	56
3.4 碲化镉薄膜电池	62
3.5 铜铟镓硒电池和碲化镉电池的原材料问题	64
参考文献	65
4 有机柔性太阳能电池	67
4.1 概论	67
4.2 体异质结电池	70
4.3 有机柔性电池的优化	72
4.4 卷对卷技术	74
4.5 涂刷技术	78
4.6 有机柔性电池的产业化	81
参考文献	86
5 染料敏化柔性太阳能电池	88
5.1 概论	88
5.2 染料敏化电池的原理	92
5.3 染料敏化电池的研发方向	99

5.4	染料敏化电池的生产工艺	104
5.5	光伏玻璃幕墙	107
	参考文献	111
6	第三代太阳能电池	114
6.1	概论	114
6.2	量子阱太阳能电池	114
6.3	纳米太阳能电池	117
6.4	石墨烯太阳能电池	121
6.5	纳米天线太阳能电池	122
	参考文献	126
7	太阳能产业的发展趋势	128
7.1	应对能源危机和全球气候变暖	128
7.2	发展太阳能的经济效益	134
7.3	太阳能市场	139
7.4	太阳能的技术发展趋势	147
7.5	超大型太阳能发电项目	150
7.6	太阳能的发展需要社会的支持	153
	参考文献	155
	索引	157

1 柔性太阳能电池和太阳能产业

1.1 柔性太阳能电池

柔性电子器件,以有机发光二极管(organic light-emitting diode, OLED)和柔性太阳能电池为代表。让我们不妨先来说说 OLED。2008 年,全球 OLED 显示面板年产量超过 1 百万片,可以说初步实现了产业化。与柔性太阳能电池很相似, OLED 的制备也是在柔性塑料衬底上沉积薄膜。作为新一代的显示器, OLED 更节能,也更方便,是未来显示产业的一个发展趋势,如图 1.1 所示。OLED 显示器的特点非常明显,厚度薄、重量轻、可弯曲,可以作为新型的电子阅读器,使用起来如纸张般地舒适、自然。德国 Plastic Logic 公司,是全世界第一家批量生产柔性主动矩阵显示器面板(flexible active-matrix display module)的企业^[1]。通过卫星通信,人们甚至可以随时随地通过带有柔性 OLED 显示器的新概念电脑上网。

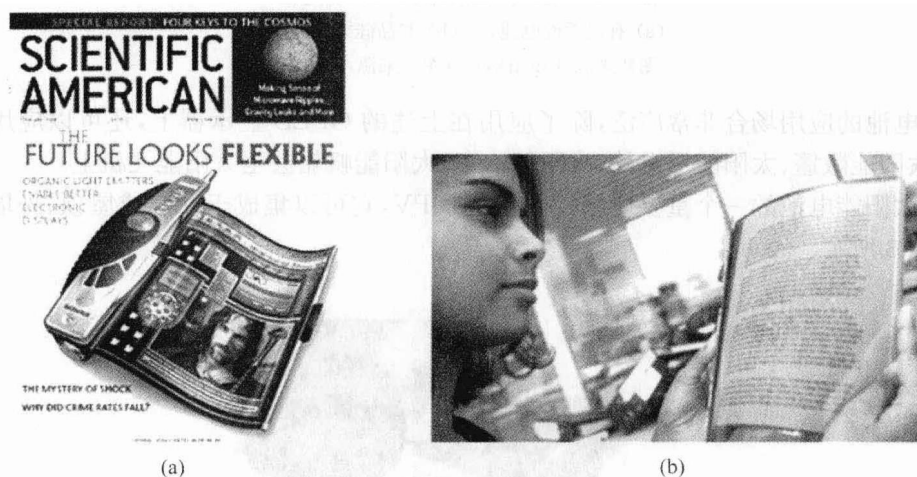


图 1.1 OLED 显示器

(a) 2004 年 2 月的《科学美国人》(Scientific American)展望了 OLED 的前景;

(b) OLED 使电子读物柔软起来

(图片来源:Plastic Logic)

是否可以请读者想象一下? 20 年后,你坐在公交汽车、地铁、火车或者飞机上,举目望去,会有 1/3 的乘客手里拿着 OLED 显示器在阅读电子书或上网。而如果还有乘客告诉你,他们的 OLED 显示器是不需要充电的,你会有什么感受? 你的惊喜就证明了科学技术的力量。因为他们的 OLED 显示器上配有柔性太阳能电池,可以随时随地在有光线的地方充电,这就是本书的主题。

柔性太阳能电池,是薄膜太阳能电池的一种,而且技术先进、性能优越、成本低廉、用

途广泛。如图 1.2 所示,瑞士 Flexcell 公司的非晶硅柔性电池质量很轻,仅为 $25 \sim 50 \text{ g/m}^2$ 。其核心工艺,是在塑料或金属箔片等柔性衬底上,印刷半导体吸收层薄膜。塑料可以选用具有导电性能的塑料或在塑料上镀透明导电膜,金属箔片可以选用满足特定要求的铝箔或不锈钢箔片。卷对卷(roll-to-roll, reel-to-reel, R2R)技术来源于高速报纸印刷技术,保证了高产出和低成本,由于制备过程不需要高温或真空,实现了低能耗生产。

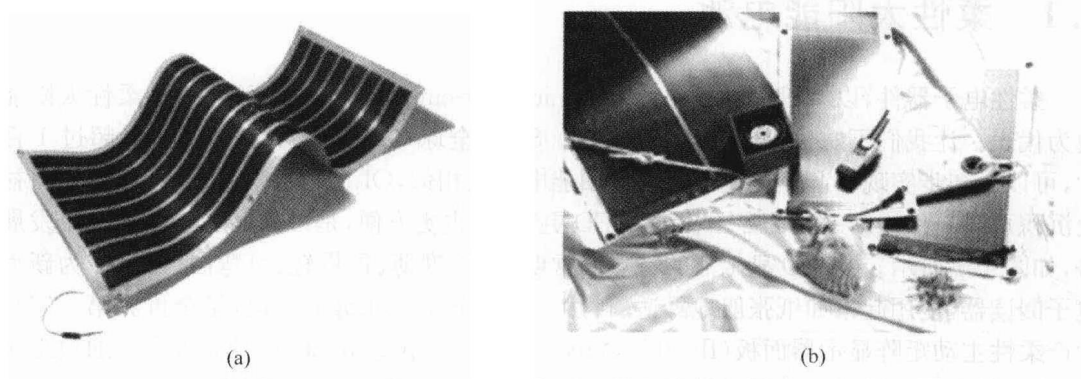


图 1.2 塑料衬底的柔性太阳能电池

(a) 有机柔性电池; (b) 非晶硅柔性电池

(图片来源:Konarka) (图片来源:Flexcell)

柔性电池的应用场合非常广泛,除了应用在上述的 OLED 显示器上,还可以应用于太阳能背包、太阳能敞篷、太阳能手电筒、太阳能汽车、太阳能帆船甚至太阳能飞机上。

柔性太阳能电池的一个重要应用领域就是 BIPV,它可以集成于窗户或屋顶、外墙或内墙上,如图 1.3 所示。

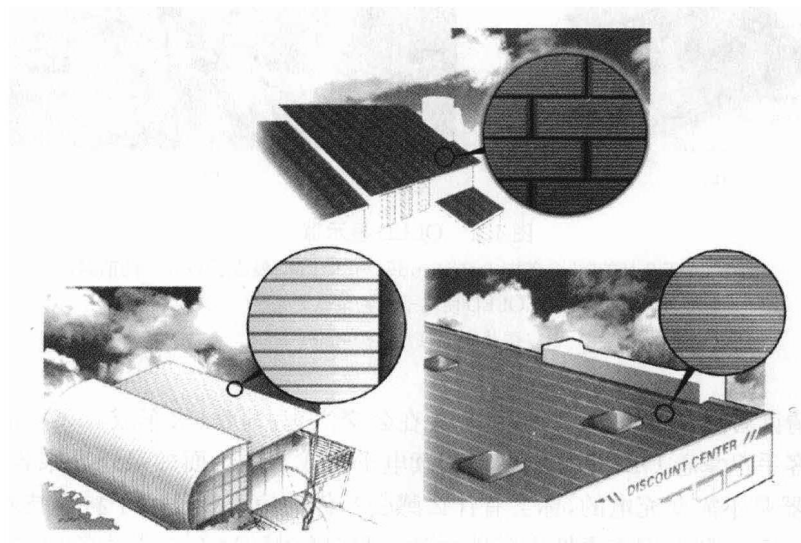


图 1.3 柔性太阳能电池实现 BIPV

(图片来源:Konarka)

在全世界各高校和研究机构中,相当一部分科学技术都可能永远不会离开实验室,来到寻常人的生活中,原因有二:第一,成本太高;第二,实用性不强。为什么柔性太阳能电池却是一个例外呢?因为柔性电池能够走出实验室,进入大规模商业化、普及化阶段,完全克服了以上两点大多数实验室科学技术的不足。它不但成本低廉,还有如下独特的应用优势:

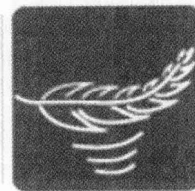
(1) 柔软:材质柔软,可以装配于各种曲面,实现各种新颖的应用。



(2) 尺寸随意:卷对卷技术可以方便地生产任意大小的柔性太阳能电池,根据具体的客户需求,可以自行定义电池的长和宽。



(3) 轻薄:衬底是塑料或金属箔片,使柔性太阳能电池重量很轻,适合各种对重量有特殊要求的场合。数 mm 的厚度使各种便携产品美观大方。



(4) 安全:与传统的晶体硅或者其他类型的薄膜电池不同,没有使用易碎的玻璃作为衬底,而使用了柔性的塑料或金属箔片,更牢固、更安全、也更持久耐用。



(5) 环保:原材料来源充沛,成本低廉,生产过程中的用电量相对较少,能量返回周期 (energy payback period) 是传统太阳能电池的 $1/5 \sim 1/3$ 。



从制备工艺上说,柔性太阳能电池运用了成熟的高速报纸印刷卷对卷技术,将半导体材料印刷到覆盖在卷筒表面的导电塑料或不锈钢箔片上,如图 1.4 所示。印刷技术节约了昂贵的原材料,并可在常压环境下生产。相比常规薄膜太阳能电池依赖昂贵的真空沉积,柔性电池使用的常压环境降低了生产成本。

如果按照标准测试条件 STC 下的峰值功率 (watt-peak, W_p) 计算,太阳能组件的平均价格,从 1975 年的 $\$100/W_p$ 下降至 2007 年底的 $\$4/W_p$,如图 1.5 所示。据 2004 年的预测,薄膜太阳能电池的成本将在 2010 年达到 $\$1/W_p^{[2]}$,使太阳能发电成本低于火电,实现所谓的平价上网。2007 年底,第一款柔性太阳能电池组件问世,该电池把无机半导体 CIGS 油墨印刷在铝箔衬底上,成本低于 $\$1/W_p$,理论上实现了平价上网(参见第 3 章)。

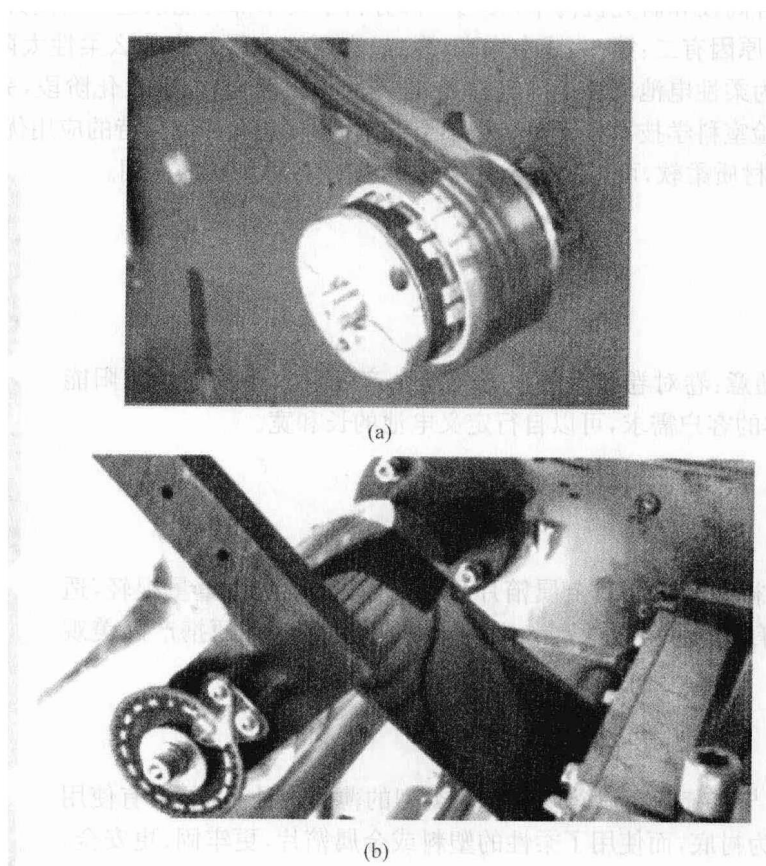


图 1.4 柔性太阳能电池卷对卷技术
(a) 卷对卷技术；(b) 在铝箔上印刷 CIGS 薄膜
(图片来源:Konarka)；(图片来源:Nanosolar)

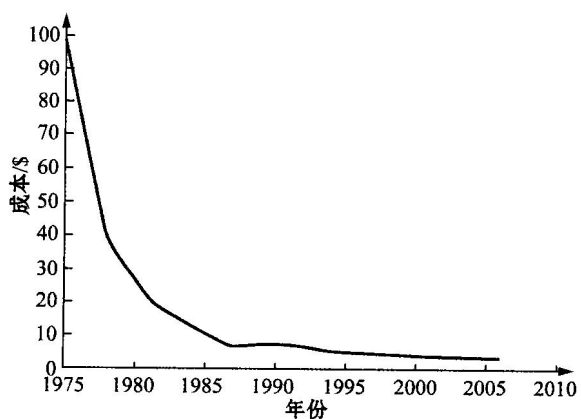


图 1.5 近 30 年,太阳能电池组件的成本递减趋势
(图片来源:Earth Policy Institute, Worldwatch, Maycock)

1.2 太阳能产业

能源危机和全球气候变暖两大问题,促使各国政府推动可再生能源的发展,而太阳能在可再生能源行业的地位举足轻重。2001 年全球电力需求是 15.578TW·h,2040 年将达 36.346TW·h,其中太阳能将占主导地位,如图 1.6 所示。

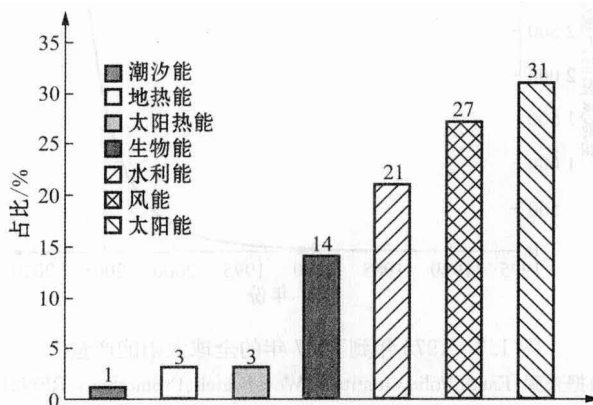


图 1.6 2040 年世界能源结构
(数据来源:IEA、EREC)

早就有人预言 20 世纪 60 年代以后,石油会逐渐枯竭^[3]。1973 年的第三次石油危机发生时,又有人重提“传统能源耗竭论”。而对著名的哈伯特石油峰值理论(Hubbert oil peak theory),争议也从未停息过^[4]。

如果我们为了支持太阳能,而过度地渲染“传统能源耗竭论”,确实有一些不客观。但是,过去几年间,石油价格飙升了 10 倍。能源投资回报率(energy return on energy invested, EROI),即产出能源焦耳数和投入能量焦耳的比值,在几十年来有明显的下滑。由于人们开采石油难度越来越大,成本越来越高,美国石油工业的 EROI 从 1930 年的 100 降至现在的 15^[5]。

能源危机的另一个成因是经济全球化,中国和印度两个发展中大国对能源的需求与日俱增。在这两个快速崛起的发展中国家中,有 7 亿农民进入城市,从事制造业,这么庞大的城市化人口相当于欧盟工人总数的两倍。目前,还有 16.4 亿的发展中国家人口仍然没有通上电。在 21 世纪,一定有更多的贫困地区,通过经济发展,使当地居民用上各种电器,这也会大幅度地增加人类对能源的需求,最终使能源危机更为严重。据预测,到 2050 年,全球的能源需求是现在的 2 倍,而到本世纪末,全球的能源需求是现在的 3 倍。

可再生能源发展的动力,除了能源危机,还有全球气候变暖。近年来,世界各国人民对全球气候的异常变化都深有感触。2007 年 6 月中旬,南欧各国也经历了 50℃ 的高温炙烤。美国南部各州,每年都要受到破坏性极大的飓风袭击。因此,我们应该加快发展可再生能源产业,遏制温室气体排放。

20 世纪 90 年代 \$10~20/桶的低油价,使太阳能这个早该鼓励发展的科学领域,完全失去了活力,许多科研方向由于缺乏研究经费被搁置了。近年来,随着石油价格的迅速攀升,太

阳能产业也以两年翻倍的速度蓬勃发展着,从 2006 年的 2521MW 发展到 2007 年的 3800MW,如图 1.7 所示^[6]。

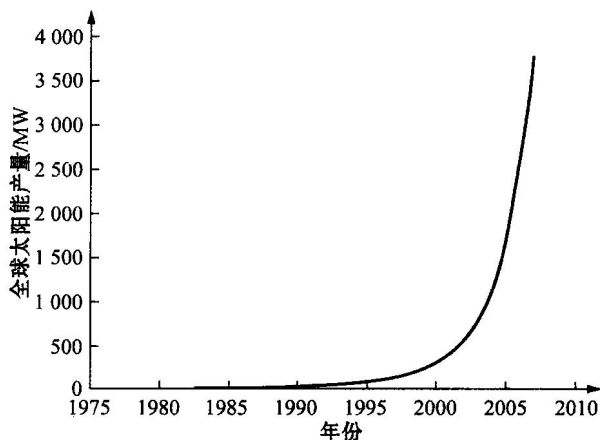


图 1.7 1975 年到 2007 年的全球太阳能产量
(数据来源:Earth Policy Institute、Worldwatch、Prometheus、REN21)

太阳能的应用也从农村电气化的离网(off-grid)发展到并网(in-grid)。如装有太阳能发电系统的西班牙一写字楼情况,如图 1.8 所示。在白天,太阳能发电量超过写字楼的用电量,多余的发电量可以上网。在晚上,写字楼需要通过电网获取电能^[7]。

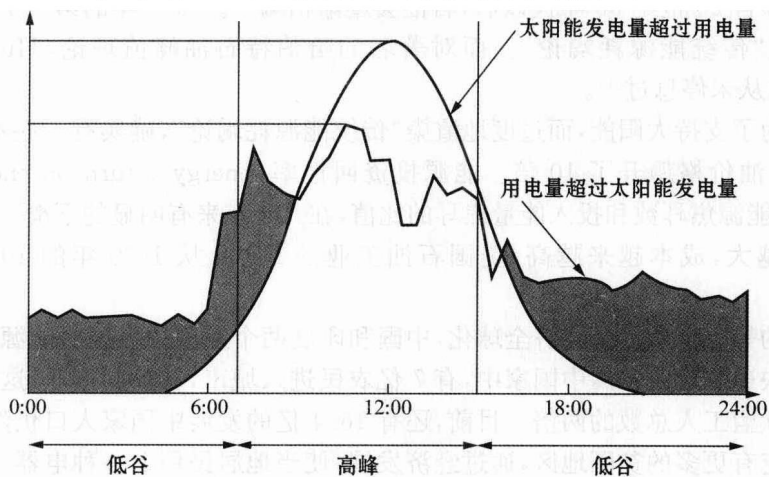


图 1.8 一天中太阳能系统发电量和写字楼用电量的比较
(数据来源 EPIA)

随着近年太阳能产业的快速发展,行业得到了大量的政府政策支持和风险投资。2006 年,全世界就有 \$ 50 亿的投入,相对前一年增长 43%^[6]。目前 \$ 300 亿的全球太阳能产业,主要的产品还是 20 世纪 70 年代开发的晶体硅电池,占全球能源市场的 0.1%。市场非常需要比传统晶体硅太阳能电池转换效率更高、成本更低廉、质量更可靠的新型太阳能电池。大规模的风险投资,也必然会促进新技术的不断发展。

1.3 太阳能电池的三次技术革新浪潮

早在 2000 年,全世界太阳能行业就定下了 2020 年的行业目标^[6]:

- (1) 把单晶硅电池的转换效率从 16.5% 提高到 22%;
- (2) 多晶硅电池的转换效率从 14.5% 提高到 20%;
- (3) a-Si/ μ c-Si、CIGS 和 CdTe 薄膜电池的转换效率提高到 10%~15%;
- (4) 发展有机电池和 GaAs 电池;
- (5) 鼓励 BIPV,以降低系统成本。

值得庆幸的是,近十年以来,太阳能产业在这几方面都取得了不小的进步。Nanosolar 提出太阳能产业的“三次技术革新浪潮”概念,如表 1.1 所示。

表 1.1 太阳能电池发展的三次技术革新浪潮

三次技术革新浪潮	第一次	第二次	第三次
	晶体硅电池	玻璃衬底、真空沉积的薄膜电池	卷对卷柔性电池
工艺	以太阳能级硅为原材料	真空溅射和沉积	不需要真空条件的印刷技术
工艺特点	硅片、电池片易碎	设备昂贵	易于规模化
生产良率	高	较高	高
材料使用率	30%	30%~50%	>95%
衬底材料	硅片	导电玻璃	导电塑料或金属箔片
电流	高	低	高
能源回收期	3 年	1.7 年	<1 个月
产出/投入	1	2~5	10~25

(数据来源: Nanosolar)

第一次技术革新浪潮发生在 30 年前,是以太阳能级硅和硅片为原材料的晶体硅电池 (crystalline silicon solar cell),它目前仍然是太阳能产业的主流,如图 1.9 所示。但是,该技术想要继续大幅地降低成本,难度不小。因为需要通过改良西门子法,提纯多晶硅,所以硅棒和硅片的价格居高不下。而且由于硅材料对太阳光的吸收系数不高,硅片必须有一定的厚度,也不利于降低成本。另外,硅片和电池片易碎,就更增加整个生产过程中的操作难度。

第二次技术革新浪潮发生在 10 年前,薄膜太阳能电池从此开始了产业化。10 年以来,以 a-Si/ μ c-Si、CIGS 和 CdTe 为代表的薄膜电池,工艺日趋成熟。薄膜电池的吸收层厚度是晶体硅电池的 1/100,相对来说产品成本较低。但是,薄膜电池的设备和导电玻璃的高成本也很难回避:

- (1) 半导体吸收层的制备需要真空沉积,工艺过程较慢,设备昂贵。
- (2) 由于采用前壁型结构需要溅射背电极,也增加了一部分的设备成本。
- (3) 因为薄膜必须沉积在导电玻璃上,而导电玻璃的成本仍然较高,一般占到产品成本的

1/3。

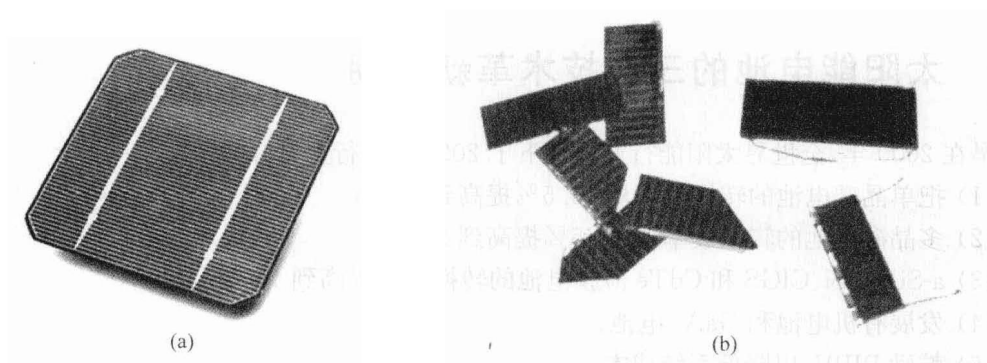


图 1.9 第一次和第二次技术革新浪潮

(a) 单晶硅电池；(b) a-Si/ μ c-Si 薄膜电池

(图片来源: Wikipedia)

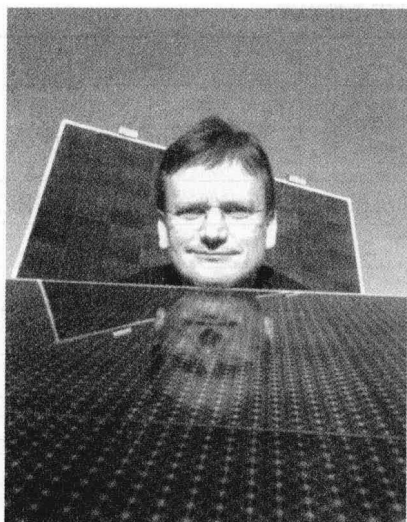


图 1.10 第三次技术革新浪潮的 CIGS

柔性电池封装成 Utility Panel™

(图片来源: Nanosolar)

第三次技术革新浪潮,以柔性电池为代表,原材料成本低廉,运用成熟的高速报纸印刷卷对卷技术,与第二次技术革新浪潮中的薄膜电池一样,无机柔性电池的薄膜厚度也是晶体硅电池的1/100,原材料成本较低。但是,不同的是,原材料不是硅烷气体,而是含有半导体材料的纳米油墨,设备也不需要真空条件。因此,可以称得上是成本最低廉的太阳能电池,如图 1.10 所示。美国 Nanosolar 公司,在铝箔上印刷 CIGS 薄膜,2007 年 12 月实现 \$1/W_p 的成本。

柔性电池企业对产品的可靠性也进行了测试,在美国亚利桑那州的沙漠中进行了高温老化测试,也在南极进行了低温老化测试,这些测试条件比官方认证机构的可靠性测试条件更为苛刻,如图 1.11 所示。测试结果表明,柔性电池在屋顶光伏系统中应用的寿命>25 年。



图 1.11 柔性电池在南极接受低温老化测试

(图片来源: Nanosolar)

染料敏化电池的寿命也较理想,在南欧气候环境下可以工作 13 年,而在中欧气候环境下可以工作 22 年,如图 1.12 所示。

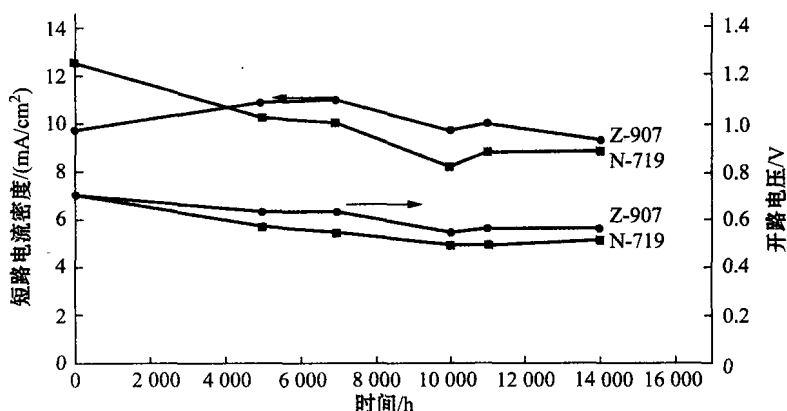


图 1.12 染料敏化电池的可靠性测试
(数据来源: Dyesol)

近年来,全球对可再生能源和可持续发展问题非常关注,在这样的大环境下,太阳能产业经过这三次技术革新浪潮,产品更多元化,应用更广泛化^[8]。通过全世界各研究机构和企业的不努力,一定会有更多、更好、更廉价的太阳能技术应运而生,从实验室进入生产线,再从生产线走向广阔的太阳能电池应用市场。

1.4 光伏建筑一体化

太阳能电池可以安装在空地 (free land) 上,建成太阳能电站 (solar power plant),以较密集的方式发电。太阳能电池也可以和建筑物结合,实现光伏建筑一体化 (building integrated photovoltaics, BIPV)。BIPV 的形式有:

- (1) 屋顶光伏一体化 (roof-integrated PV);
- (2) 墙面光伏一体化 (wall-integrated PV);
- (3) 光伏玻璃幕墙 (PV facade)。

发达国家的人们生活富裕,安装太阳能发电系统时,除了可以增加一定的收入和体现环保意识,还有美化建筑的目的。如图 1.13 所示,在纽约一座公寓的车库屋顶上,安装的晶体硅太阳能系统更像是一件艺术品。太阳能电池组件被固定在靛蓝色的金属框架中,并配以花岗岩的底座^[9]。标准组件经过艺术化的包装后,大大增加了其附加值。

还有一座英国建筑,也是 BIPV 的典型例子。这幢位于曼彻斯特的摩天大楼,具有 40 年的历史,建筑外墙的马赛克已经逐渐脱落,墙体的水泥层暴露在外。最近,在这幢 25 层、120 米高的建筑的外墙上,安装了 7000 个太阳能电池组件。在这样的改造之后,深蓝色的多晶硅薄膜电池,使建筑更有现代感,能够起到防水、防潮的作用,并提供了建筑所需 30% 的电力,如图 1.14 所示。

染料敏化电池可以被加工成不同的颜色,由建筑师根据自己的设计构思,加以组合,使建筑真正地成为科技和艺术的结晶。在 2005 年日本爱知县世博会上,丰田馆把染料敏化电池取



图 1.13 纽约公寓上的太阳能系统
(图片来源:纽约时报)

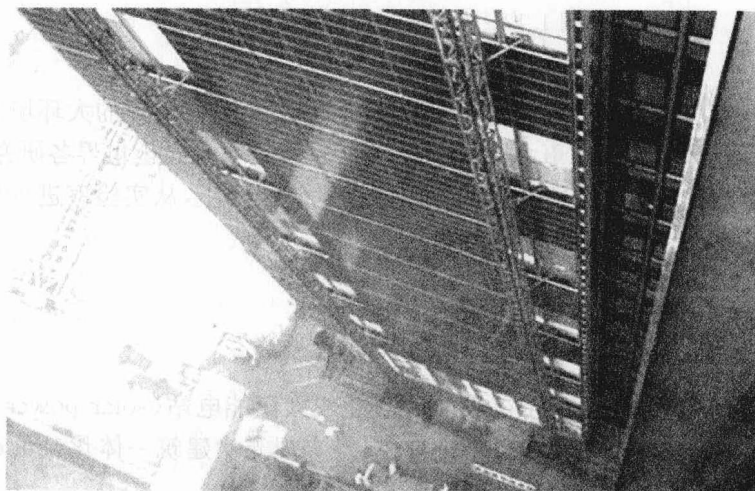


图 1.14 曼彻斯特的摩天大楼进行了 BIPV 改造
(图片来源:Inhabitat.com)

代传统的玻璃,通过光伏玻璃幕墙,展现 BIPV 的概念,如图 1.15 所示。当这种透明的太阳能组件被安装在窗户上,室内的光线仍然会相当充沛,又可以避免阳光的直射。

柔性电池可以直接安装到屋顶,不需要框架和支架,减小了安装成本,市场前景广阔。在比利时城镇 Halle 的一家工厂屋顶上,安装商 Biohaus 采用了 United Solar Ovonic 的柔性非晶硅薄膜组件,输出功率为 136kWp,如图 1.16 所示。这样的组件长 5.5m,宽 0.39m,厚 4mm,重量却只有 7.7kg,寿命 20 年,建议屋顶坡度 $5^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。使用了三结非晶硅技术,底电池掺 Ge,组件的转换效率较高。非晶硅的弱光性好,所以除了朝南的屋顶,朝东的和朝西的屋顶也可以安装。

下面两个案例都使用玻璃衬底的 CIGS 薄膜电池。作为墙面的 BIPV,他们可以取代昂贵的天然石材或不锈钢结构,减少了建筑建造成本。德国 Ulm 的小麦筒仓,高 102m 的墙面上安装了 1300 片黑色的 CIGS 电池组件作为光伏玻璃幕墙,总功率达 98kWp,如图 1.17 所示。