

北京市科委软科学研究课题 (Z101108002110017)

光伏产业路线图

——北京光伏产业技术路线图研究

李海玲 王红梅 王文静 等著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



北京市科委软科学研究课题 (Z101108002110017)

光伏产业路线图——北京 光伏产业技术路线图研究

李海玲 王红梅 王文静 蔡永香 李大鹏 谢潜思 著



机械工业出版社

本书从战略的角度全面剖析了光伏产业未来的发展,并结合实际情况提出了北京光伏产业发展的愿景目标。本书从产业链的角度,对技术产业的现状与发展趋势进行了全面且系统的分析。此外,本书还对北京光伏产业中的技术壁垒进行了介绍,并给出了攻克技术壁垒的对策。本书附录中还给出了国外经典的光伏产业路线图供读者参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

光伏产业路线图:北京光伏产业技术路线图研究/李海玲等著. —北京:机械工业出版社, 2012. 2

ISBN 978-7-111-37213-4

I. ①光… II. ①李… III. ①太阳能发电 - 电力工业 - 产业发展 - 研究 - 北京市 IV. ①TM615②F426. 61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 012016 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:付承桂 责任编辑:任 鑫 版式设计:刘 岚

责任校对:张 媛 责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 6.5 印张 · 138 千字

0 001—2 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-37213-4

定价:30.00 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

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着社会的发展，能源与环境问题越来越凸显，因此清洁、可再生能源的开发与应用得到了广泛的关注。在众多可再生能源中，光伏发电具有成本较低、转换效率较高，并且应用形式广泛、不受环境限制等优点，成为了最具发展前景的可再生能源。随着光伏发电技术的日益成熟，光伏发电在能源体系中的地位被一再重新定义，从传统能源的补充能源到现在的最重要的传统能源的替代能源之一，国际能源署（IEA）甚至认为在 2100 年左右，光伏及光热发电将能够提供 80% 以上的总能源需求，成为人类的主要能源。光伏发电技术潜力巨大！

事实上，光伏发电技术已走出实验室，发展成具有一定规模的产业。光伏产业的发展，促进了光伏发电技术的成熟、发电成本的下降，也带动了经济的发展，同时创造了大量的劳动岗位。2010 年世界累计光伏装机量达到近 40GW，累计发电约 50TW·h。以每兆瓦创造 35 个工作岗位计算，光伏产业累计提供约 150 万个工作岗位。然而，光伏发电电价仍高于常规发电电价，光伏发电市场仍是市场补贴下的市场。随着光伏发电技术的进步，光伏发电平价上网时代即将到来。世界各国及各研究机构普遍预测，光伏发电的平价上网将在 2015 ~ 2020 年实现。光伏发电平价上网的实现意味着光伏发电自由市场的实现，也意味着光伏发电市场规模的激增。在产业快速发展前夕，产业技术更加活跃。新技术不断涌现，革新无处不在，任何一项新技术的成熟都可能导致整个产业技术格局的巨变。因此，放眼未来、定位聚焦、找准市场、逆向思考、探索技术发展路径，无疑具有重要意义。

“北京光伏产业技术路线图研究”项目正是在这样的背景下诞生的。由北京市科委科技宣传与软科学处立项，拟在北京地区采用路线图方法开展北京市光伏产业技术路线图研究，分析光伏产业未来市场需求和发展趋势，剖析北京市太阳能光伏产业的行业环境、资源状况，确定北京市太阳能光伏产业的发展目标和关键问题，系统地探讨并选择适合于北京光伏产业的技术发展路径。

本项目是北京市科委软科学处的 2010 年招标课题。项目研究过程中得到了



市科委科技宣传与软科学处和北京市长城企业战略研究所的大力支持和指导，他们对课题研究方向的把握、路线图方法的指导是课题顺利完成的关键，课题组表示衷心的感谢。同时也感谢北京高新技术创业服务中心在课题进行过程中给予的帮助，感谢课题进行期间配合调研的京内京外光伏企业和业内专家。最后感谢课题组全体成员，通过北京新材料发展中心和中国科学院电工研究所的所有课题成员通力合作，克服种种困难，最终保证课题高效优质的完成。本书正是在“北京光伏产业技术路线图研究”的基础上完成的。

由于时间、水平和经验有限，书中难免有所疏漏或不妥之处，欢迎社会各界专家、读者批评指正。

李海玲

中国科学院电工研究所

目 录

前言

第 1 章 引言	1
1.1 背景	1
1.2 目的	2
1.3 工作方法	2
1.4 主要结论	2
1.5 相关建议	2
第 2 章 综述与背景	4
2.1 光伏产业发展前景预测	4
2.2 制定产业技术路线图的范围和边界	8
2.3 制定产业技术路线图方法论概述	8
2.4 产业技术路线图制定工作方法（流程）概述	10
第 3 章 行业技术路径分析	11
3.1 产业技术分析	11
3.1.1 晶体硅电池	11
3.1.2 薄膜电池	12
3.1.3 染料电池	13
3.1.4 有机电池	14
3.2 电池技术特征	14
3.2.1 转换效率	14
3.2.2 组件衰减	16
3.2.3 对温度的敏感性	16
3.3 光伏发电系统应用种类	17
3.4 市场细分	18
第 4 章 光伏产业国内外对比分析	20
4.1 晶体硅电池产业	21
4.1.1 多晶硅提纯	21
4.1.2 硅片制造	22
4.1.3 电池/组件制造	23
4.2 薄膜电池产业	24
4.2.1 薄膜硅电池产业	24
4.2.2 CIGS 电池产业	26
4.2.3 CdTe 电池产业	26
4.3 光伏设备制造产业	27



4.3.1	晶体硅电池制造设备产业	27
4.3.2	薄膜硅太阳能电池生产装备	28
4.3.3	其他薄膜电池生产设备产业	28
4.3.4	总结	29
4.4	光伏逆变器产业	29
4.5	光伏市场分析	30
4.5.1	市场应用现状	30
4.5.2	光伏市场鼓励政策	31
4.6	我国光伏产业大省现状	34
4.6.1	江苏省	34
4.6.2	浙江省	35
4.6.3	河北省	35
4.6.4	江西省	35
4.6.5	四川省	35
4.6.6	福建省	36
4.7	光伏技术研发现状分析	36
4.7.1	晶体硅电池	36
4.7.2	薄膜硅电池	37
4.7.3	CIGS 电池	38
4.7.4	CdTe 电池	40
4.7.5	光伏逆变器	42
4.7.6	光伏研发水平差距分析	43
第 5 章 北京光伏产业 SWOT 分析		45
5.1	北京光伏产业现状分析	45
5.2	北京光伏技术研发现状分析	49
5.3	北京光伏产业现状总结	51
5.4	北京光伏产业 2015 年愿景分析	52
第 6 章 市场需求与产业目标分析		53
6.1	市场需求分析	53
6.1.1	市场应用区域需求分析	53
6.1.2	市场应用类型需求分析	53
6.1.3	市场技术需求分析	55
6.1.4	2011 ~ 2015 年市场需求分析	56
6.2	产业目标分析	57
第 7 章 技术壁垒及研发项目分析		58
7.1	晶体硅电池产业分析	58
7.1.1	晶体硅电池产业链分析	58
7.1.2	晶体硅电池产业技术壁垒及研发项目分析	59
7.2	薄膜硅电池产业分析	62
7.2.1	薄膜硅电池产业链及技术分析	62



7.2.2 薄膜硅电池产业技术壁垒及研发项目分析	63
7.3 逆变器技术	65
7.4 储备技术	66
7.4.1 CIGS 太阳电池	66
7.4.2 CdTe 太阳电池	67
第 8 章 北京光伏产业技术路线图绘制	68
8.1 晶体硅电池技术	69
8.1.1 晶体硅电池产业愿景与目标	69
8.1.2 晶体硅产业技术发展路线图	69
8.1.3 分阶段目标	69
8.1.4 关键技术实现途径	70
8.2 薄膜硅电池	70
8.2.1 薄膜硅电池产业愿景与目标	70
8.2.2 薄膜硅电池产业技术路线图	71
8.2.3 分阶段目标	71
8.2.4 关键技术实现途径	72
8.3 逆变器技术	72
8.3.1 愿景与目标	72
8.3.2 需开展研发项目	72
8.4 储备技术	73
8.4.1 愿景与目标	73
8.4.2 需开展研发项目	73
第 9 章 配套政策	74
第 10 章 结束语	77
附录	78
附录 A 课题参与单位和人员	78
附录 B 经典路线图汇编	78
B.1 技术路线图——太阳能光伏 (Technology Roadmap-Solar Photovoltaic Energy)	78
B.2 欧洲光伏产业协会路线图 (EPIA Roadmap)	88
B.3 光伏产业路线图至 2030 年及以后 (PV Roadmap to 2030 +)	90
B.4 太阳能发电的未来——美国光伏产业路线图至 2030 及以后 (Our Solar Power Future-The U. S. Photovoltaic Industry Roadmap Through 2030 and Beyond)	92

第 1 章

引言



1.1 背景

光伏产业过去 10 年间的超高速发展证明了其作为一种战略性新兴产业在世界能源系统中的重要性。光伏技术及其产业的发展不仅涉及国计民生，而且是国家安全战略的重要组成部分。2009 年我国大陆产出太阳能电池组件 4011MW，占当年全球产出 10660MW 的 38%，连续第三年保持全球产量第一，拉动的 GDP 至少在 1000 亿元以上。它涉及的产业链包括金属硅材料的还原、高纯硅的提纯、硅片的制备、太阳能电池制备、电池组件、光伏系统平衡部件的制造、光伏制造业专用设备的制造、系统安装、产业链专用原材料的制备等。

光伏发电技术，作为可再生能源发电技术中最为成熟的发电技术之一，具有清洁、安装简单、低维护及模块化等优点，将逐渐部分地取代传统能源为人类生产、生活提供能源，成为传统能源的替代能源，因而光伏产业的市场前景非常广阔。我国光伏产业的前期发展主要依赖于通过简单的产线复制达到规模的扩张，在这一轮发展中，北京落后于其他光伏大省，主要是因为北京的土地、水、电、气等资源成本限制了单纯的规模化扩张。光伏产业通过近十年的技术发展和规模扩张极大地降低了电池组件的成本，而成本的下降速度是制约产业发展速度的一个关键因素。据乐观估计，光伏发电成本将在 10~20 年后达到与常规能源相竞争的程度。因而，光伏产业已经发展到了一个非常关键时期，区别于前 10 年的发展，下一阶段光伏产业的发展将更依赖于技术水平的提升。北京光伏产业的突出特点正是研发基础雄厚、技术实力强，因而在这个难得的历史机遇面前，北京应充分发挥优势，抓住机会，依托高端研发实现高端制造，树立北京光伏产业在国内的地位，创造北京经济的新增长点。



1.2 目的

“北京光伏产业技术路线图”是“科技北京”建议研究的一项专项技术路线图课题，对支撑科技服务业发展具有重要意义，旨在根据“科技北京”行动计划中“大力实施科技振兴产业工程，推动首都经济又好又快发展”的要求，统筹整合首都人才、资金、政策等各类创新资源，加快发展科技服务业。通过路线图的研究，对我国乃至世界范围内光伏产业发展需求进行分析，结合北京在该领域的发展现状，明确北京未来5年在该相关领域的发展重点，发现技术壁垒，凝练技术需求，为北京市政府科技主管部门、行业主管部门提供政策建议，为企业提供发展指引，为研发机构提供科技立项建议，最终为政府培育壮大光伏产业提供支撑和科学决策，从而促进“科技北京”的建设。



1.3 工作方法

北京光伏产业路线图由北京新材料中心和中国科学院电工研究所共同承担，参与课题20人，历时4个月完成。课题采用德尔菲法、头脑风暴法等方法，通过企业调研、专家访谈、调查问卷及专家研讨会等形式凝聚了行业专家、行业技术人员、企业代表等产业相关人员的意见和建议，涉及了北京光伏产业的各个产业环节的企业和研究单位，全面体现了北京光伏产业各行业发展意愿，最后通过科学的方法归纳整理出了北京光伏产业技术路线图。



1.4 主要结论

北京光伏产业路线图主要的结论如下：

- 1) 北京光伏产业的突破点在高端技术与高端制造上，应利用现有基础发挥优势，将北京打造成高端技术与制造中心；
- 2) 设备制造方面，加速关键设备国产化进程，有针对性地突破技术壁垒，实现2015设备国内占有率第一的目标；
- 3) 电池制造方面，加速实验室向产线技术的转移，重点在于高效电池技术的产业化；
- 4) 逆变器技术方面，大型光伏并网、微网逆变器性能达到国际先进水平，实现示范应用；
- 5) 技术储备方面，加强CIGS、CdTe的研发投入，为其产业化的到来做准备。



1.5 相关建议

相应的建议如下：



1) 加强研发投入。关注产业发展态势，预测产业发展趋势，制定短、中、长期研发计划；资助结构应该考虑处于不同发展阶段的不同种技术。

2) 通过联合研发中心（实验室）、重大项目、产业技术联盟等形式加强产学研合作，疏通产学研通道，加速实验室技术向产业的转移。

3) 集中力量扶持重点企业的技术突破，带动北京光伏产业技术的进步。

4) 重视检测与认证，加快完善光伏并网标准和光伏产品的检测和认证体系；研发光伏并网系统、部件等的检测仪器、技术方法及相关的检测标准，从而保证光伏并网的质量和可靠性，增强北京光伏产业的市场竞争力。

第 2 章

综述与背景



2.1 光伏产业发展前景预测

光伏产业是世界上发展速度最快的产业之一，2004 ~ 2009 年的世界总产量分别为 1201MW、1793MW、2561MW、4000MW、7900MW、10660MW，其年平均增长率达到了 55.2%。在 2008 年的世界性金融危机的重创下，光伏产业受冲击最小且恢复最快，仍保持着旺盛的增长速度。这些足以说明光伏产业在世界经济体系中的重要地位及潜力。

光伏发电作为传统能源的替代产品，具有清洁、绿色、模块化、低维护等特点。光伏发电不仅可以在用电高峰期在传统电力提供补充，而且还可以经济有效地作为电网延伸的替代技术解决偏远地区无电户的用电问题，在不远的未来还将作为传统能源的替代能源为世界能源供应发挥重要作用。目前世界上无电人口达 20 亿左右，发达国家和发展中国家都在积极开展光伏乡村电气化项目，这将是光伏应用的一个主要市场。图 2-1 表明了光伏将越来越在全球能源供应中起到主要作用。在 2030 年左右，光伏（及光热）将开始表露出其在全球能源供应中的位置，在大约 2050 年光伏（及光热）占能源供应的比重将达到 20% 左右，而到本世纪末将占据主要位置。图 2-2 所示为不同情景下预测的光伏装机容量的发展趋势。无论哪种模式都意味着光伏产业将表现出较高的增长速度，即使是增长速度最慢的 ETP 蓝图情景。到 2050 年，光伏产业的规模也将达到近 2000GW，是 2010 年总装机容量的 60 倍之多。

近一两年，欧美日等光伏大国都纷纷重新更正了之前对光伏产业发展的预测，对光伏发电在整个能源体系中起的作用持更乐观的态度，认为光伏发电将在不远的未来为解决整个人类的能源需求起到显著的作用。

2008 年欧洲光伏工业协会（EPIA）发布“Solar Generation V-2008”，认为在政策驱

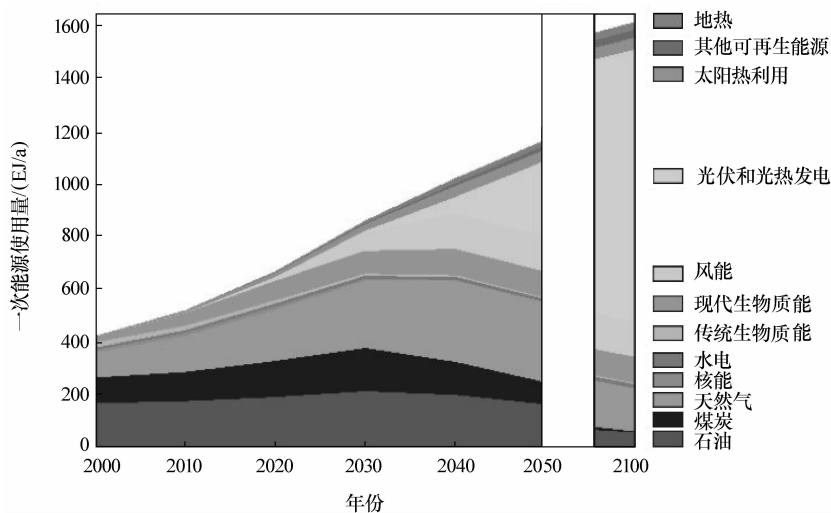


图 2-1 全球能源发展预测 (2000 ~ 2100 年)

(Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit, Springer, ISBN 3-540-40160-1)

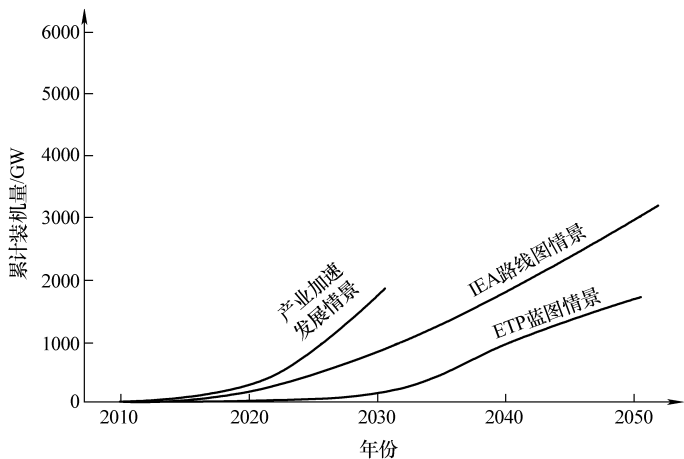


图 2-2 不同情景下预测的光伏装机容量增长趋势

(IEA Energy Technology Perspectives 2008)

动条件下 2020 年欧洲光伏的累计装机容量将达到 100GW。

2009 年 6 月，EPIA 公布了“Set for 2020”，它将光伏发电的目标分三种情景对 2020 年欧洲的光伏累计装机容量进行分析和预测，认为：基本发展模式：100GW，加速发展模式：200GW，理想发展模式：400GW，它们将分别占欧洲电力总需求的 4%、6% 和 12%。

美国太阳能工业协会（SEIA）在哥本哈根会议上宣布：美国到 2020 年光伏将提供全部电力需求的 10%，太阳能热利用提供的热水、采暖和制冷将替代电力需求的 3%，太阳能热发电将提供电力需求的 2%。光伏到 2020 年将提供 67.6 万个工作岗位，每年减排 3.8 亿 t 二氧化碳。按照 1MWh 光伏电力减排 1t 二氧化碳，则 2020 年美国的光伏累计装机容量将达到 350GW。

2010 年 2 月美国国会在加利福尼亚州“百万太阳能屋顶”计划的基础上提出了全



国范围的“千万太阳能屋顶计划”。该计划是在未来 10 年内在美国全国 1000 万屋顶上安装太阳能光伏发电，仅此一项计划就有大约 100GW 的装机容量。

2008 年 6 月 9 日，时任日本首相福田康夫发表了电视演说，计划在 2030 年以前在目前的基础上日本将再增加 40 倍太阳能电池装机容量。执行部门又进一步细化为在 2020 年达到累计装机容量为 2005 年（1.4GW）的 20 倍，即 28GW，2030 年为 40 倍，即 56GW。

虽然有很多因素都将影响到光伏产业的发展，但是当光伏发电成本达到可以和常规能源相竞争后，光伏发电产业必将得到大规模发展。

伴随着光伏产业大规模扩张的是光伏产品价格的降低，光伏市场的建立及光伏产业的扩张速度也都部分地取决于光伏产品价格的降低。光伏产业的建立及光伏产业的扩张速度也都部分地取决于光伏产品价格的降低。光伏产业同其他新兴产业一样都将遵循一定的学习曲线，该学习曲线将决定一个产业随着规模的扩张，产品价格下降的比例。以过去的晶体硅电池产业的发展情况计算得到光伏产业的经验因子为 0.19，如图 2-3 所示。这意味着当光伏的总产量达到 100GW 时，光伏组件的价格可以达到 1 美元/W。对薄膜电池而言，由于薄膜电池成本较低，当总产量达到 20GW 时可以达到 1 美元/W 的价格。然而，实际上光伏产品的价格下降速度要快于这个预测值，因为光伏产业的技术还处于成熟发展期，技术的不断进步及新材料、新技术的开发在很大程度上加速了这种价格的降低，这又反过来促进了光伏产业的发展。

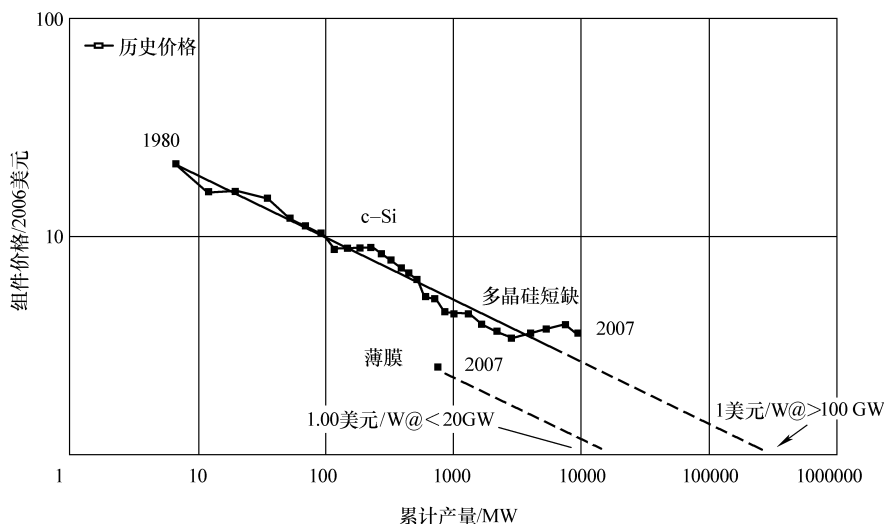


图 2-3 晶体硅和薄膜电池产业的经验因子计算和预测（图中斜线为拟合曲线）

图 2-4 为根据德国电力情况给出的光伏发电成本随着时间的下降曲线。由图中可见光伏发电成本与当地的日照水平有关。图中曲线①、②分别为年平均日照数为较差的 900h 和较好的 1800h 时的光伏发电成本随时间的下降趋势，日照情况越好，相同组件的发电成本越低。曲线③、④为私人零售和小规模商业用电价格，曲线⑤、⑥为大型工业用电价格。从图中可见，随着能源的消耗，常规能源发电价格将逐步上升，而光伏发电随着技术的成熟和产业规模的扩张将逐渐下降。因此从图中可见，在 2020 年左右将

实现光伏发电与私人零售用电价格相当，这意味着光伏发电将可以大规模用做居民日常生活用电；在 2040 年或以后，光伏发电将可能同工业用电价格相当，大规模用于人类所有社会活动中。

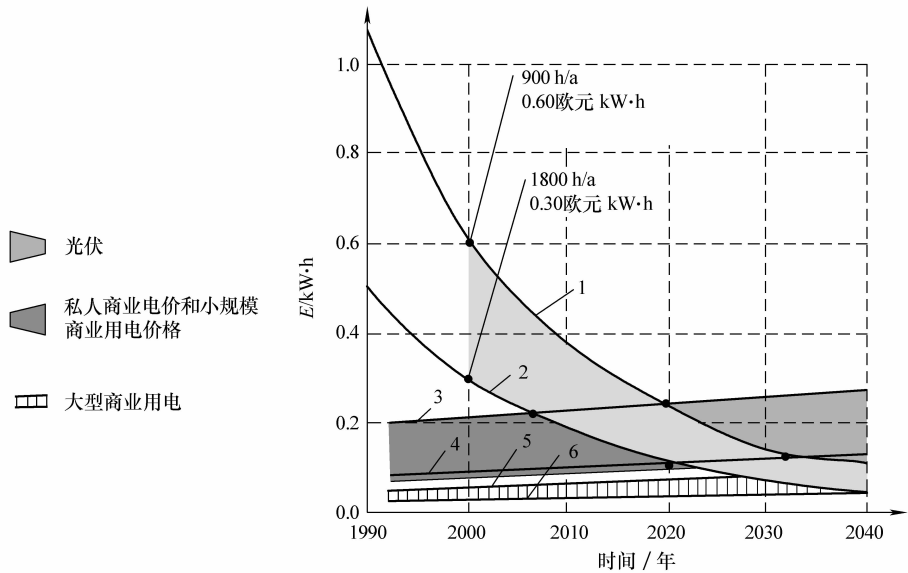


图 2-4 光伏发电与常规能源发电价格的竞争

为了实现光伏产业的扩张，光伏产业链必须具有支撑产业扩张的能力，如按照 EPIA 的加速模式的预测，到 2020 年世界光伏装机容量将达到 163GW（见图 2-5），这意味着光伏产业链必须要提供相当于 163GW 的电池配套原材料和相应的设备制造能力，这将极大地带动相关产业的发展。同时这也意味着，仅靠硅原材料可能无法满足产业这样的扩张速度，除了晶体硅之外，还应同时大力发展其他材料的电池，如硅薄膜、CIGS、CdTe 电池等，以满足光伏产业的扩张。

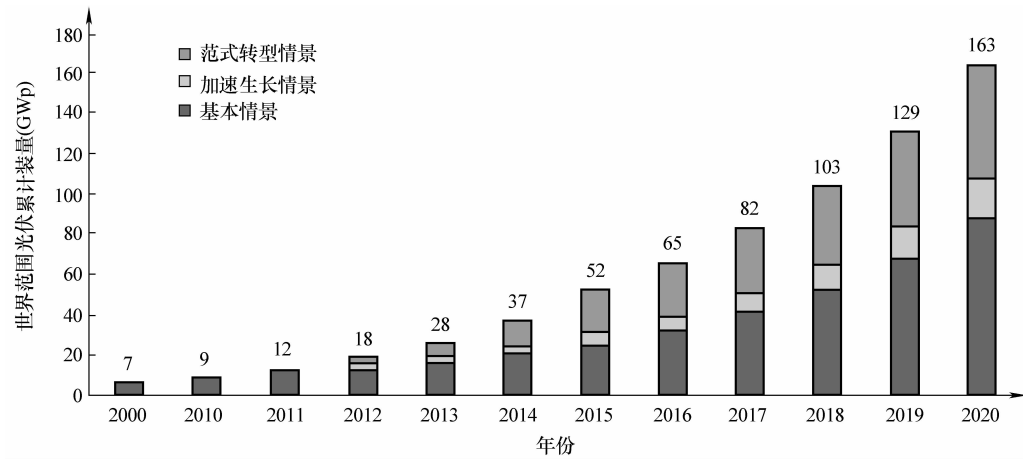


图 2-5 光伏产业 2009 ~ 2020 年产量趋势（引自 EPIA，A. T. Keamey analysis）

图 2-6 给出了随着时间的推移，不同光伏技术在整个光伏产业中占有的比例。随着



产业规模的扩张，到 2030 年，晶体硅电池、薄膜电池和新技术电池将各占 1/3 左右。这意味着，晶体硅电池尽管所占比例有所下降，但长期内仍不会退出市场，仍将是市场主流技术；薄膜电池及新技术电池将在近期改变目前的局势，在产业技术上获得发展，成为光伏市场的生力军。

总之，无论是受迫于环境和能源压力，还是光伏技术本身的成熟和进步，光伏产业都必将得到大规模扩张，在不远的将来成为人类能源系统中一种重要的发电技术。随着光伏产业规模的扩张及技术的进步，光伏产品的价格也必定会不断降低，直到发电成本达到与常规发电技术相竞争的水平。而技术的进步不仅体现在现在主流的晶体硅电池技术上，在未来，没有哪一种技术具有完全优势，多种技术的共同进步才是光伏产业的发展方向。

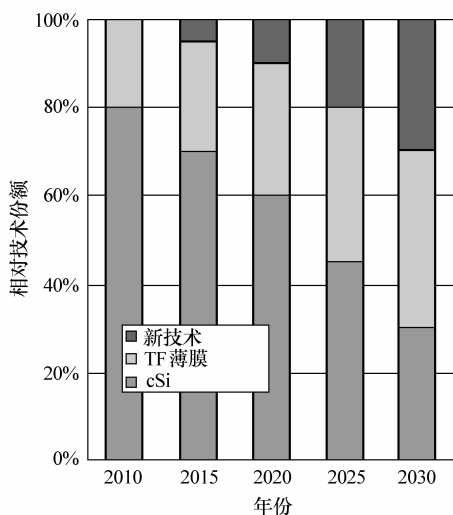


图 2-6 不同光伏技术所占市场份额的变化（2010 ~ 2030）



2.2 制定产业技术路线图的范围和边界

北京光伏产业技术路线图涉及整个光伏产业链，包括配套的原材料产业和设备制造产业。本书从整个产业链的角度分析了北京光伏产业的基础和优势及劣势，并根据北京的特点，制定了北京光伏产业技术路线图。

在太阳能电池设备制造环节，主要的技术包括自动化成套设备技术、真空技术、等离子放电技术、大面积均匀性技术等，主要产品包括铸锭及切片设备（大尺寸单晶炉、大尺寸铸锭炉、多线切片机）、晶体硅太阳能电池产生线成套设备（清洗机、扩散炉、PECVD 系统、全自动丝网印刷机、烧结炉、自动效率测试仪及分选机等）、薄膜电池制造设备（PECVD 沉积设备、大尺寸磁控溅射设备等）。

在高效低成本太阳能电池制造技术方面主要分成单晶硅高效太阳能电池和低成本薄膜太阳能电池。其主要技术包括激光掺杂光诱导化学镀技术、非晶硅晶体硅异质结技术、金属电极穿透技术、N 型电池技术、非晶硅锗薄膜电池、II-VI 族薄膜太阳能电池技术。形成的产品主要是转换效率高于 19% 的单晶硅太阳能电池，转换效率大于 17% 的多晶硅太阳能电池；转换效率大于 8% 的非晶硅硅锗或非晶硅/微晶硅薄膜太阳能电池。



2.3 制定产业技术路线图方法论概述

制定北京光伏产业路线图涉及方法有

1) 德尔菲法；