



# 中国光伏产业清洁生产

Clean Production of Solar PV in China

# 研究报告



# 中国光伏产业清洁生产 研究报告

## Clean Production of Solar PV in China

主要作者：李俊峰 常 瑜

协调员：李 昂 李 硕

图片版权：© 绿色和平

2012年3月



# 目 录

## 1 光伏产业发展现状 / 01

- 1.1 产业规模不断扩大，清洁生产压力增大 / 01
- 1.2 设立多晶硅准入条件，整顿淘汰光伏落后产能 / 03
- 1.3 严重依赖外需市场，低价竞争和贸易纠纷愈演愈烈 / 05

## 2 光伏清洁生产的标准 / 06

## 3 光伏生产环节的环境影响 / 09

- 3.1 生产工艺 / 10
- 3.2 “三废”排放情况与相关处理措施 / 13
- 3.3 环境影响以及减排潜力 / 15

## 4 能源消耗与碳足迹 / 18

- 4.1 晶体硅电池光伏发电产业链能耗 / 18
- 4.2 光伏发电的碳足迹 / 19

## 5 清洁生产技术与经济可行性分析 / 21

- 5.1 清洁生产与多晶硅生产成本 / 22
- 5.2 硅片与清洁生产 / 23

## 6 清洁生产的必要性 / 26

- 6.1 企业发展的基本原则 / 26
- 6.2 节约成本，提高竞争力 / 27
- 6.3 应对绿色贸易壁垒 / 27

## 7 主要问题 / 28

## 8 建 议 / 30

## 9 主要结论 / 32

## 附录一：国内企业的案例介绍

## 附录二：光伏清洁生产的相关政策文件

## 致 谢



# 引言

由于其安全、少污染、可循环和资源无限等优良属性，太阳能成为人类发展所必须的清洁能源。中国的太阳能资源极其丰富，与其他能源从可获得性上相比，优势十分明显。

中国的光伏产业在 2004 年后开始飞速发展，2007 年中国已经成为世界最大的太阳能电池生产国，2010 年太阳能电池产量达到 13GW，电池组件产量上升到 10GW，占世界产量的 45%，太阳能电池产量连续五年世界第一。与此同时，中国的光伏发电市场也在逐渐起步，2010 年安装光伏发电 500MW，累计达到 900MW，居世界前十。2011 年预计中国的光伏电池和组件的产量分别达到 20GW 和 16GW，仍居世界第一，发电装机容量可以达到 3.6GW，仅次于德国、意大利，居世界第三位。

但是，这个尚处在发展初期的产业也存在着一些问题，亟需尽快解决。清洁生产就是其中之一。国内的光伏企业良莠不齐，有些企业想通过将环境和健康成本外部化来降低自身生产成本，获得更多竞争力。而这种做法无异于饮鸩止渴，会带来更多的发展隐患。

本研究作为首份对国内光伏清洁生产现状进行梳理的报告，分析了国内光伏产业链各个环节的环境影响，以及产品能量回收期等问题，探讨了光伏清洁生产的必要性及经济性。通过分析光伏生产中存在的问题，报告还提出了改进建议。

报告的调研范围是国内产业链中的一线企业，占国内产能的 30%。由于晶硅电池为主流技术，其市场份额在 95% 以上，其产能也占据国内的 95% 以上，故本报告以晶硅电池为主要研究对象，暂不涉及薄膜电池清洁生产问题。从产业链来说，研究涵盖的包括多晶硅原料的生产、硅片、电池片和电池组件的制造以及光伏系统的安装。考虑到产业链末端的逆变器生产属于电子集成，环境影响相对较小，产业链的环境影响评价侧重在多晶硅、硅片、电池和组件这四个主要环节。这条产业链占整个光伏产业价值的 80% 以上，能耗占整个产业的 90% 以上，能够代表光伏产业的环境影响和能耗水平。



# 1 光伏产业发展现状

## 1.1 产业规模不断扩大，清洁生产压力增大

在 market 需求的拉动下，中国的光伏产业链规模已经形成。无论是装备制造还是配套的辅料制造，国产化进程都在加速。在光伏产业链中，多晶硅企业 70 多家，硅片企业 60 多家，光伏电池组件企业 700-800 家，截至 2011 年底，国内光伏企业已经有 11 家美国上市公司，8 家香港上市公司，14 家国内上市公司，行业年产值超过 3000 多亿元，进出口额 220 亿美元，就业人数 30 万人。

在上游的多晶硅方面，2005 年以后，国内外光伏市场迅猛发展，对多晶硅的需求迅速增长，使得中国多晶硅产业规模迅速扩大。如图 1 所示，2007、2008 和 2009 年的产能分别达到 1000、5000 和 20000 吨，2010 年产能 / 产量达到超过 8.5/4.5 万吨，预计 2011 年将分别达到 16/9.1 万吨。国内多晶硅企业，如中能硅业、江西 LDK、洛阳中硅、大全集团等，产能规模已经或将跻身世界前列。

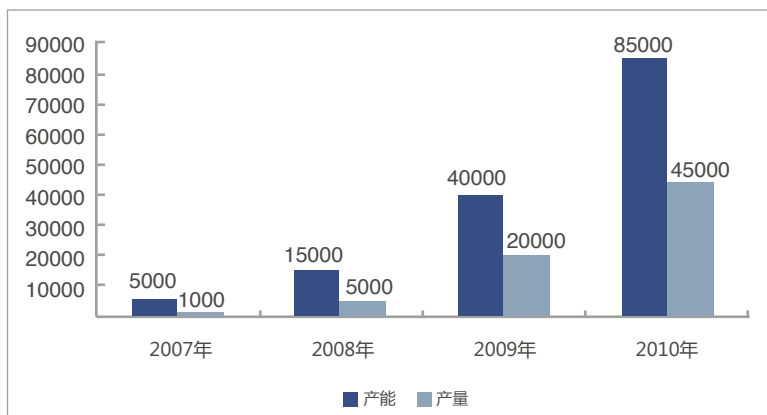


图 1、2007-2010 年中国多晶硅产能 / 产量情况 (吨)

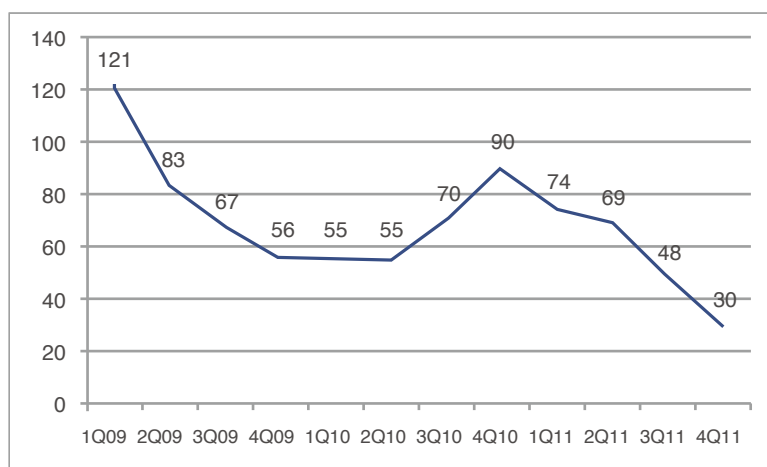


图 2、多晶硅价格趋势 (单位 : 美元 /kg)

由于多晶硅市场前阶段供不应求，价格水平长期居高不下（见图 2），受暴利驱使，很多地方开始新建多晶硅项目。在能源短缺、电价较高的地区，出现了重复建设倾向，一些地区违法、违规审批、未批先建、边批边建的现象。这些项目缺乏配套综合利用、环保不达标。国外先进企业的能耗能够做到 80-100 kWh/kg，生产成本低于 25 美元/kg，而国内多数企业的能耗还远远达不到先进水平，其产品也不具备竞争力，代价高昂，造成了一部分落后产能出现。

对于下游硅片、组件等产业链环节，也存在着盲目投资、重复建设、缺乏可持续理念等问题。特别是一部分企业对提高效率、降低成本以及企业管理的重要性并不了解，这使得企业缺少核心竞争力，只能通过低价低质的恶性竞争在行业中挣扎。这都使得行业在快速发展的同时，清洁生产、降低能耗等问题也面临着巨大的挑战和压力。



## 1.2 设立多晶硅准入条件，整顿淘汰光伏落后产能

光伏行业的高利润、高补贴等因素，吸引了大量企业趋之若鹜，一方面推动了产业的快速发展，但是国内项目无序上马的负面现象也逐渐显现出来。2009年9月，国务院38号文件（见附录二）指出国内多晶硅存在产能过剩的情况。随后，国内主要银行收紧对多晶硅企业的贷款，减少对多晶硅项目的备案与审批，在市场冲击下，国内多晶硅企业建设趋于理智。

2010年年底，国家发布了《多晶硅行业准入条件》（详见附录），对多晶硅生产的选址、能耗、环保、规模做出了明确规定和限制。行业标准的出台提高了行业门槛，有助于淘汰那些落后产能。2011年12月，工信部对首批20家符合《多晶硅行业准入条件》的企业名单进行公示（见表1）。多晶硅生产要求较高的固定成本以及相当规模的启动现金成本，国家对多晶硅准入限制又提高了产能准入门槛，多晶硅产业开始进入理性化发展阶段。

近年来，国内多晶硅生产企业在降低生产能耗和生产成本上有很大提高，平均综合能耗和还原能耗分别由2006-2007年的300kWh/kg以上和200kWh/kg左右，下降至2010年的160kWh/kg和80kWh/kg左右，能耗降幅近50%。而生产成本也由最初的70美元/kg降至目前的30-40美元/kg左右，部分多晶硅企业的生产成本已降至20-25美元/kg，可与国际先进企业水平竞争。

《多晶硅行业准入条件》是目前为止唯一一份针对光伏行业的管理规定。其出台虽然表明政府有意规范光伏行业发展，但也从侧面显示出，对于行业全产业链的管理是十分不充分的。2012年两会期间，温家宝总理在其政府工作报告中明确提出“防止太阳能、风电设备制造能力盲目扩张”，希望这一表态可以发挥作用。

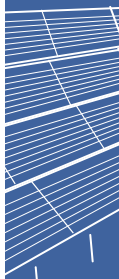


表 1、首批 20 家符合多晶硅准入条件企业名单及产量

	省 份	企业名称	2009 年 产量(吨)	2010 年 产量(吨)
1	江苏	江苏中能硅业科技发展有限公司	7454	17853
2	河南	洛阳中硅高科技有限公司	2204	4011
3	重庆	重庆大全新能源有限公司	1523	4000
4	江西	江西赛维 LDK 光伏硅科技有限公司	2200	6300
5	四川	四川新光硅业科技有限责任公司	951	1100
6	四川	东方电气集团峨眉半导体有限公司	655	1200
7	四川	天威四川硅业有限责任公司	50	800
8	四川	四川瑞能硅材料有限公司	190	1300
9	四川	四川永祥多晶硅有限公司	700	900
10	四川	乐山乐电天威硅业科技有限责任公司	-	1617
11	陕西	陕西天宏硅材料有限责任公司	200	800
12	青海	青海黄河上游水电开发有限责任公司	-	-
13	青海	亚洲硅业(青海)有限公司	-	1300
14	浙江	浙江中宁硅业有限公司(硅烷法)	-	-
15	湖北	宜昌南玻硅材料有限公司	515	1400
16	云南	昆明冶研新材料股份有限公司	-	-
17	内蒙	内蒙古神舟硅业有限责任公司	-	-
18	内蒙	内蒙古盾安光伏科技有限公司	-	-
19	宁夏	宁夏宁电光伏材料有限公司(冶金法)	-	-
20	新疆	特变电工新疆硅业有限公司	-	-

### 1.3 严重依赖外需市场，低价竞争和贸易纠纷愈演愈烈

在太阳能电池组件方面，中国是世界最大的电池生产国，产量占全球产量的一半以上。2010年国内组件的实际产量也达到10.5GW，而且电池组件的产能还在持续增加中，预计2011年电池和组件的产量分别是20GW和16GW，2005-2011年中国太阳能电池组件产量及增长率如图3所示。

2010年，中国光伏发电的新增装机为500MW，国内95%以上的光伏产品依赖出口。国内光伏产业供需失衡，对海外市场严重依赖，易受到欧美市场波动影响。一方面由于欧美市场增速放缓，国内产能释放，库存大量积压，导致了激烈的价格战，使得企业盈利下降；另一方面，产品的大量外销也导致欧美国家对中国光伏产品提起反倾销诉讼，引发贸易战。2011年10月，以Solar World公司为首的7家美国光伏电池厂商向美国政府提出申请，对中国的晶硅光伏电池产品提起双反调查。中国的光伏产品价格过低已经成为多方指责的对象，暴露出中国光伏产品成本中除了劳动力、土地等生产成本外，环境成本被压制过低的现状。

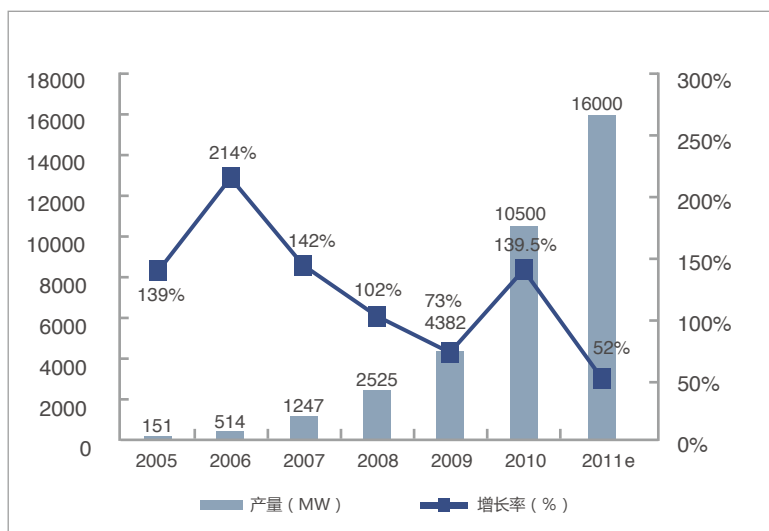


图3、2005-2011年中国电池组件产量



## 2 光伏清洁生产的标准

对光伏行业产业链而言，“清洁生产”应当可以划分为三个阶段、三个标准。



首要的也是基本的目标是严格执行**现行标准**。作为年产值数千亿的工业产业，光伏企业的技术工艺和排放也应符合国家、地方政府和所在工业园区环保标准（见表2）。企业生产过程中产生的废气、废水、废渣、设备噪声、员工生活污水、生活垃圾等环境不利因素的排放要执行相关的排放标准，生产工艺要符合行业规定。企业能够严格贯彻《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国环境影响评价法》、《清洁生产促进法》等法规中环境保护的要求，企业的生产技术标准符合国家的资源综合利用和能耗指标。

表 2、国家相关环境保护标准

	执行标准
环境空气质量	执行《中华人民共和国环境空气质量标准》(GB3095-1996) 及 2000 年修改
水环境	执行《中华人民共和国地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 执行《中华人民共和国地下水质量标准》(GB/T14848-93)
声环境	执行《声环境质量标准 GB12348-2008》 执行《城市区域环境噪声标准》(GB3096-93)
废气	工艺废气执行《中华人民共和国大气污染物综合排放标准》(GB16297-96) 锅炉废气执行《锅炉大气污染物排放标准》(GB13271-2001)
废水	执行《污水综合排放标准》(GB8978-1996)
噪声	执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008)
固废	执行《危险废物贮存污染控制标准》(GB18597-2001) 和《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》(GB18599-2001)
资源回收和能耗指标	通过《多晶硅行业准入条件》

在达到国家环保标准要求的基础上，更进一步的要求是执行**先进标准**，指以先进企业的生产情况为标准，代表行业发展的先进水平。在做到达标排放的基础上，企业能够淘汰落后生产工艺，更新、改造落后老化的工艺、设备，完善生产环节，进一步实现节能降耗，减少产品的单位能耗，增加污染治理设施（见表 3）。

这一先进标准应作为中国光伏行业之后发展的主要方向，特别是一些龙头企业，应该在达标排放的基础上将清洁生产的要素融入产品研发和设计，从源头减少对环境有负面影响的排放。

从长期发展来看，应对企业提出更高的标准，即做到完全的“零排放”或是“近零排放”。一方面要控制生产过程中不得已产生的废弃物排放，将其降低到最少；另一方面将不得已排放的废弃物充分利用，整个光伏产业链能够做到少排放、能循环和可持续。尽管对目前国内企业来说，要实现“近零排放”还很难，但这却是工业生产的**未来标准**。



表 3、光伏产业清洁生产先进措施

环节	措施
原材料采购	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 了解供应商碳排放情况，通过绿色采购措施，尽可能降低原料在供应商范围内的碳排放</li> <li>● 使用清洁的原材料，采用先进工艺技术与设备，从源头消减污染，提高资源综合使用效率</li> </ul>
产品设计	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 设计绿色产品，减少材料对环境的影响，降低产品的碳足迹</li> </ul>
产品生产	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 扩大生产规模，提高生产效率，降低单位能耗，减少固废、废液、废气和噪声</li> <li>● 在新建、改建、扩建项目规划和实施期间，合理配置相关设施，优先选用清洁能源和节能设施</li> <li>● 能耗设备安装变频器</li> <li>● 冷风机和风冷热泵的优化</li> <li>● 利用水源热泵技术</li> <li>● 污水集中处理等</li> </ul>
产品包装与运输	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 减少包装用量，循环使用包装，提高运输安全，采用海运和铁路等低碳的运输方式</li> </ul>
产品使用	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 延长产品的使用寿命，减少产品使用时对环境的影响</li> </ul>
资源综合利用与回收	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 在多晶硅环节使用冷氢化技术，提高四氯化硅和三氯氢硅循环利用</li> <li>● 在多晶硅环节使用闭路循环技术，减少原料损耗并减少废气排放</li> <li>● 增加 PEG 砂浆的循环利用，利用金钢线代替钢线切割等</li> <li>● 通过回收太阳能电池板，尽可能再利用和再循环</li> </ul>
先进企业的产品能耗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 多晶硅生产能耗水平降低到 80kWh/kg 以下</li> <li>● 多晶硅铸锭能耗降低到 7kWh/kg 以下</li> <li>● 电池生产能耗降低到 1.5kWh/WP 以下</li> </ul>





### 3 光伏生产环节的环境影响

晶硅电池的制造流程比较复杂,产业链包括:石英砂、金属硅、多晶硅、硅锭/硅棒、硅片、光伏电池、光伏组件和光伏发电系统。产业链的不同环节由不同的生产厂商完成,上游的多晶硅制造属于化工生产,中间的电池生产属于半导体的行业,下游的系统制造属于电子集成,上下衔接直至最终的光伏发电系统。报告以下将逐一梳理光伏产业各个生产环节。

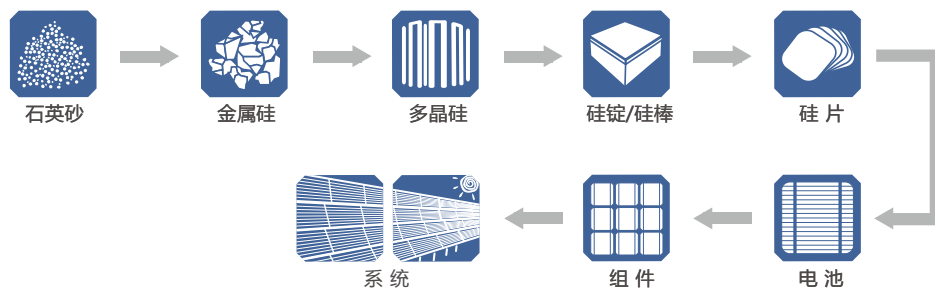


图 4、光伏产业链示意图

## 3.1 生产工艺

### 3.1.1 多晶硅

目前多晶硅的生产技术主要包括：改良西门子法、物理冶金法和硅烷法。改良西门子法能耗较高在 80-200kWh/kg，纯度可以达到电子级多晶硅标准 9N-12N，物理冶金法虽然能耗较低为 30-50kWh/kg，但是纯度只能做到 5N-6N，而且生产出的多晶硅存在纯度不均匀，产出的电池存在转换效率衰减等问题。第三种为硅烷法，可以生产 12N 以上的电子级多晶硅，但是硅烷属于易燃易爆物质，存在一定的安全隐患（见表 4）。

表 4、多晶硅生产工艺对比

	改良西门子法	物理冶金法	硅烷法
纯度 (N)	9-12	5-6	12
能耗 (kWh/kg)	80-200	30-50	75-120
成本 (\$/kg)	18-45	10-20	25-35
存在问题	能耗高	能耗低，电池转化率衰减	易爆炸

改良西门子法（见图 5）因技术相对成熟，可以相对较低的成本生产出高纯度的多晶硅，是目前多晶硅生产的主流技术，占全球多晶硅产能的 80%，在中国的多晶硅产能中份额超过 90%。一般认为多晶硅生产属于“高耗能”，由于多晶硅在还原过程中，需要在高温条件下完成，消耗大量的电能。另一方面，多晶硅生产中的副产品四氯化硅属于危险化学品，如果处理不当将产生危害，这也是多晶硅曾被认为是“高污染”行业的原因之一。多晶硅的生产产生了四氯化硅、三氯氢硅、氢气和氯化氢，单纯来看这些是“有毒有害”的，但是改良西门子法完全可以做到“可控可还”，从合成到蒸馏，从还原到尾气分离，做到循环利用。

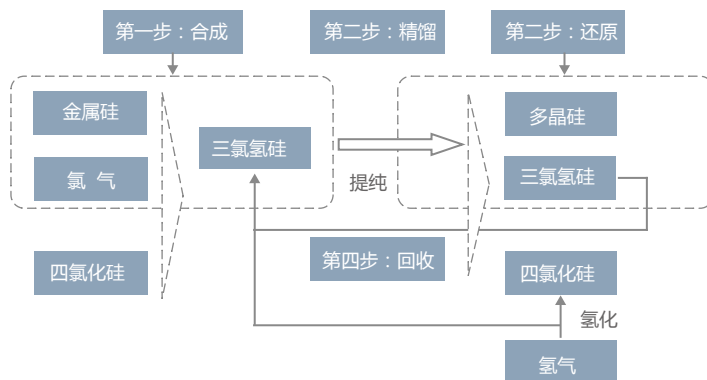


图 5、改良西门子法流程图

表 5、改良西门子法生产工艺

生产环节	生产工艺
合成	将金属硅粉碎为原料氯化氢生成拟溶解的三氯氢硅。
提纯	过滤硅粉，冷凝三氯氢硅，四氯化硅，回收四氯化硅，多级精馏三氯氢硅。
还原	净化后三氯氢硅被氢气还原，沉积在硅棒上，四氯化硅送氯化系统转化成三氯氢硅，提纯后再返回还原工序生产。
回收	在还原环节仅大约 1/3 的三氯氢硅发生反应生成多晶硅，回收将尾气中得氢气、氯化氢、三氯氢硅、四氯化硅等各种组成成分全部进行回收利用。

### 3.1.2 硅片

硅片的加工是太阳能光伏电池生产过程中的重要环节，多晶硅锭和单晶硅棒需要切割成硅片后再加工成光伏电池芯片。主要切割方式为游离磨料多线切割，使用聚乙二醇型的切割液，与切割钢线配合进行切割。加工流程如图 6 所示。

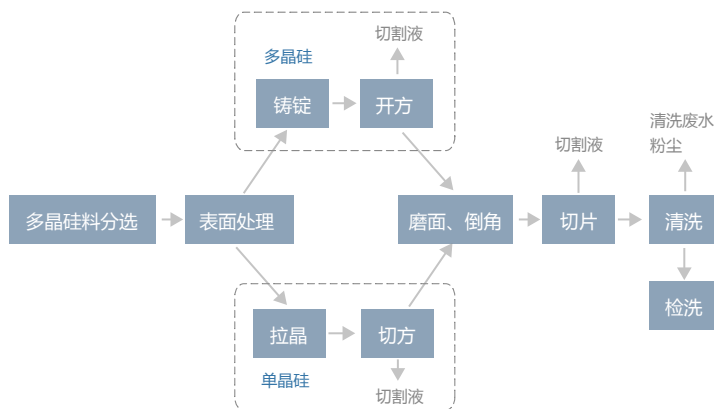


图 6、硅片加工流程图

在制作多晶硅硅片前首先对主料多晶硅分选和清洗放入坩埚中，用熔炉熔炼，直接冷却后形成硅锭，用金属线将硅锭切成方形硅锭，经过磨面和倒角，再用金属线将硅锭切成晶片，然后在清水中漂洗，烘干，最后测试晶片。切割液为聚乙二醇与少量添加剂混合而成。

废砂浆主要由聚乙二醇、碳化硅微粉、磨碎的晶硅颗粒组成，此外还混有水、切割液中的助剂以及有机胶粒、二氧化硅、铁屑等。为了降低成本，废砂浆中的聚乙二醇和碳化硅颗粒通常被回收利用。废砂浆是这个环节里废水的主要组成成分，会造成水体化学需氧量的升高，需要通过沉淀，过滤等手段去除，达到环保标准后才能排放。硅片生产企业往往采用过滤等方式对碳化硅颗粒直接进行回收。此外也有公司专门从事废砂浆的回收利用，通过离心分离等方式将聚乙二醇切割液和碳化硅颗粒进行回收并销售给硅片加工企业。

### 3.1.3 电池

从硅片到电池组件的过程中，第一步是将硅片加工成电池片。加工时，首先在硅片上进行硼、磷、锑等微量元素的掺杂和扩散，扩散在石英管制成的高温扩散炉中进行。通过掺杂和扩散在硅片上形成 P/N 结，然后采用丝网印刷法在硅片表面上形成电路。将导电银浆印在硅片正面上制成栅线及电极，经过烧结，同时制成背电极并在背面其余部分印刷铝浆，并在有栅线的面涂覆减反射膜，以防光能被光滑的硅片表面反射掉（见图 7）。

此环节会用氢氟酸清洗硅片，“三废”中会含有氢氟酸，特别是氟离子，需要加入钙离子溶液进行沉淀才能做下一步处理。

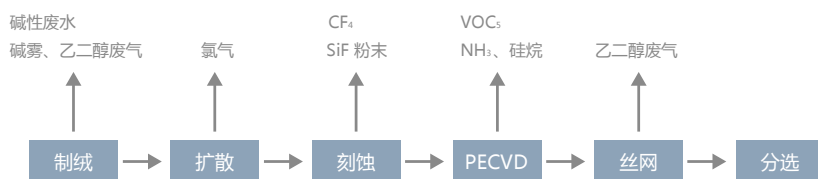


图 7、太阳能电池生产流程示意图

### 3.1.4 组件

太阳能光伏组件工艺又叫电池封装，电池的封装可以使电池寿命得到保证。首先对电池分选，为了使性能一致或相近的电池组合在一起，然后背面焊接电池串接在一起形成一个组件串，经过检验合格后，将组件串、玻璃和切割好的 EVA、背板按照一定的层次叠层后层压，最后装框粘接接线盒（如图 8）。

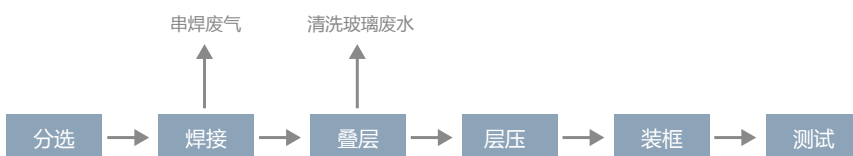


图 8、太阳能电池组件生产流程示意图



### 3.2 “三废”排放情况与相关处理措施

表 6 所示为每个生产环节产生的主要污染物，以及相应的措施和技术。按照现行的环保法规和政策，污染物必须通过相应的措施进行处理，经过测定，达标排放。

由于一些环节，如多晶硅、硅片、电池等会使用氢氟酸或者四氯化硅等危险化学品，其产生的废弃物需严格按照操作规程，交由有资质的部门或单位处理。

表 6. 光伏产业各环节环境影响以及处理措施一览

环节	三废	主要污染物	处理措施
多晶硅	液体废物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 废气淋洗水</li> <li>● 纯水制备排水等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 氯硅烷水解产生的盐酸和二氧化硅，盐酸与碱反应形成中性水，进一步处理后达标排放</li> <li>● 硅芯酸洗废水需要用中和沉氟工艺进行处理，过程产出的含氟废气通过氢氧化钠溶液洗涤后经 25 米高气筒外排</li> </ul>
	气体废物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 四氯化硅，每生产 1 吨多晶硅产生 10-20 吨四氯化硅</li> <li>● 三氯氢硅合成工序中排出的尾气，主要是硅尘、氢气、氯化氢、氯硅烷</li> <li>● 硅芯制备程序，对硅芯进行干燥，酸腐蚀有氟化氢和氮氧化物气体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 将系统产生的废气通过管道汇集到废气站，利用氯硅烷极易水解和酸碱中和，用碱性水对废气进行喷淋洗涤</li> <li>● 蒸馏残液在进行水解处理时会产生氯化氢废气，经过氢氧化钠溶液后外排</li> <li>● 四氯化硅和三氯氢硅等产物会进入闭路循环，被回收以及重复利用，成为原材料</li> </ul>
	固体废物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 硅粉、二氧化硅、石灰石渣</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 二氧化硅通过压滤固化回收给有资质的单位</li> </ul>
硅片	液体废物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 切割液，主要成分为 PEG（聚乙二醇）是废水化学需氧量<sup>1</sup>主要来源</li> <li>● 清洗剂（类似洗洁精）</li> <li>● 含酸废水</li> <li>● 含硅废水</li> <li>● 生活污水</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 污水通过物化方法和生化方法综合处理，达标排放               <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; 物化方法去除大颗粒和悬浮物</li> <li>&gt; 生化方法通过微生物的代谢作用，将废水中的有机物、有毒物质分解为简单的、稳定的无毒物质</li> </ul> </li> <li>● 由于固废中含有氢氟酸等危险化学品，需交给有资质的单位处理</li> </ul>

<sup>1</sup> 化学需氧量（COD 或 COD<sub>Cr</sub>）是指在一定严格的条件下，水中的还原性物质在外加的强氧化剂的作用下，被氧化分解时所消耗氧化剂的数量，以氧的 mg/L 表示。化学需氧量反映了水中受还原性物质污染的程度，这些物质包括有机物、亚硝酸盐、亚铁盐、硫化物等，但一般水及废水中无机还原性物质的数量相对不大，而被有机物污染是很普遍的，因此，COD 可作为有机物相对含量的一项综合性指标。

(接上页表 6)

环节	三废	主要污染物	处理措施
硅片	气体废物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 硅料处理和多晶硅锭生产的各类废气</li> <li>● 硅料处理主要是氟化物、氮氧化物</li> <li>● 多晶硅锭生产含尘废气及热氨气</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 含酸废气用碱混合液喷淋吸收，吸收液进污水处理系统</li> <li>● 含尘废气用水吸收和袋式除尘器收尘两种，含尘液进污水系统，收集的固废回收再利用</li> </ul>
	固体废物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 废坩埚</li> <li>● 污水处理底泥</li> <li>● 废酸等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 一般固废回收再利用，处理至环卫单位</li> <li>● 由于固废中含有氢氟酸等危险化学品，需交有资质单位处理</li> </ul>
电池	液体废物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 清洗产生的酸碱废水</li> <li>● 含氢氟酸废水</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 酸碱废水收集到废水站进行处理，达标排放</li> <li>● 含氢氟酸废水废酸，投入氯化钙中和，确保氟离子达标排放</li> </ul>
	气体废物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 酸碱废气</li> <li>● 氢氟酸雾</li> <li>● PECVD<sup>1</sup> 尾气主要含残余硅烷、氨和挥发有机物</li> <li>● 氯气</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 含酸废气用碱混合液喷淋吸收，吸收液进污水处理系统</li> <li>● PECVD 尾气先经燃烧处理，再用清水喷淋，废气达标后排放。喷洗水中主要含硝酸排入厂内废水中和调节池处理</li> <li>● 氯气采用废碱液喷淋后达标排放。吸收液饱和后送酸碱废水处理设施处理</li> </ul>
	固体废物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 硅片边角料</li> <li>● 污水处理底泥</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 硅片边角料由回收单位回收再利用</li> <li>● 由于固废中含有氢氟酸等危险化学品，需交有资质单位处理</li> </ul>
组件	液体废物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 清洗玻璃废水</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 废水直接排放到污水处理厂</li> </ul>
	气体废物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 串焊废气</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 串焊废气直接排入大气</li> </ul>
	固体废物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 包装固废</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 委托有资质的单位进行处置和回收利用</li> </ul>

<sup>1</sup> PECVD :辅助化学气象沉积技术

### 3.3 环境影响以及减排潜力

下表归纳出太阳能光伏各生产环节的环境影响及能耗水平。需要指出的是，光伏行业的上游有更强的节能减排以及降低生产成本的潜力。这其中，多晶硅环节具有最大的减排潜力，且成本下降的空间也最大，这其中的企业应该努力创新，将清洁生产技术的改进和提高作为企业的核心竞争力。

表 7、光伏生产各环节环境影响

环节	三废	能耗	减排潜力	成本降低潜力	评价
多晶硅					<ul style="list-style-type: none"> <li>“三废”排放有较大的治理空间</li> <li>高能耗</li> <li>减排潜力巨大</li> <li>较大的成本下降空间</li> </ul>
硅锭 / 硅棒					<ul style="list-style-type: none"> <li>“三废”排放有治理空间</li> <li>能耗居中</li> <li>有较大的减排潜力</li> <li>一定的成本下降空间</li> </ul>
硅片					<ul style="list-style-type: none"> <li>“三废”排放有较大的治理空间</li> <li>能耗居中</li> <li>有较大的减排潜力</li> <li>较大的成本下降空间</li> </ul>
电池					<ul style="list-style-type: none"> <li>“三废”排放有一定的治理空间</li> <li>能耗水平较高</li> <li>有一定的减排潜力</li> <li>一定的成本下降空间</li> </ul>
组件					<ul style="list-style-type: none"> <li>“三废”排放存在治理空间</li> <li>能耗较低</li> <li>存在减排潜力</li> <li>一定的成本下降空间</li> </ul>
系统					<ul style="list-style-type: none"> <li>“三废”排放存在治理空间</li> <li>能耗居中</li> <li>存在减排潜力</li> <li>一定的成本下降空间</li> </ul>

### 3.3.1 多晶硅行业的环境影响

根据国家工信部发布的多晶硅行业准入名单,有 20 家企业符合《多晶硅行业准入条件》。目前中国的多晶硅企业有 70 多家,只有 20 家通过了审查,说明中国的多晶硅企业只有不到三分之一的企业能够满足能耗和环保达标的基本要求。这 20 家企业水平也参差不齐,有的生产规模达到了万吨级,有的规模较小,有的还在建设中没有实际生产。

虽然现状不令人满意,但与“十一五”规划时期相比,还是有所进步。2006 年每生产 1 公斤多晶硅的平均单位能耗水平为:工业硅 1.8-2.0 公斤、液氯 1.8 公斤、综合电耗 300-350 千瓦时,到 2010 年分别下降为:工业硅 1.3-1.4 公斤、液氯 1.0 公斤、综合电耗 160-180 千瓦时,部分骨干企业达到 130-150 千瓦时/公斤。生产晶硅太阳能电池的多晶硅用量从 2006 年的 11g/Wp 下降到 2010 年的 7-8g/Wp。

2011 年,多晶硅的市场价格跌幅超过 60%,价格下降到 30 美元/kg 以下,而国内多数多晶硅企业的生产成本高于 40 美元/kg,生产成本倒挂导致多数企业停产开始技术改造,例如天威旗下的三家多晶硅企业全部宣布停产检修,浙江协成硅业成为首家宣布破产的企业,更多的多晶硅生产企业尝到了苦果,通过了工信部门槛的 20 多家企业,能够继续生产的企业不到 10 家。

只有能耗水平和成本控制处在行业领先水平的企业,才能逆境生存。这几家企业的产能占国内多晶硅产能的一半,也说明国内只有一半的产能能达到先进的清洁生产标准。但是目前国内还没有企业能够做到 100% 的四氯化硅和三氯氢硅的循环生产,没有达到“近零排放”的标准。从国际经验来看,“近零排放”在技术上是不存在瓶颈的。未来,多晶硅企业可以通过产业的升级和技术改造,进一步降低能耗水平,其减排和降低成本的潜力巨大。

### 3.3.2 光伏产业其它环节的环境影响

经过几年的探索和实践,清洁生产已经被广泛的应用到光伏行业中。在多晶硅、铸锭切片、电池、组件等生产环节中,清洁生产使得光伏系统的成本大幅度降低。除了多晶硅行业以外,中国光伏产业中从硅片到电池组件的生产设备、工艺都采用了国际上比较先进的生产标准,其产品普遍达到国际先进水平。目前,中国光伏组件企业多达 700-800 家,其中较大规模的企业都已经成为上市公司。在市场监管下,上市公司在社会责任方面应当作出更好的表率。到 2011 年年底,整个太阳能行业有 11 家美国上市公司,8 家香港上市公司,14 家国内上市公司。但是,我们发现只有少数几家企业发布了企业社会责任报告,披露了企业的能耗水平和“三废”排放情况,现在看起来,这是唯一披露光伏企业环境信息的渠道。这暴露出中国光伏企业对清洁生产认识不足,多停留于口号和形式的问题。

由此产生的违法、违规的现象频现,比如在常规污染控制方面还存在很多漏洞。从生产技术上看,“三废”实现达标排放是不存在瓶颈的,但是由于以下三个原因,一些企业在环保达标方面还存在缺憾。一是地方政府对企业的监管不力、执法不严;二是企业不达

标排放的成本较低，导致一些企业，在常规污染物：废液、废气、废渣，包括生物需氧量、化学需氧量各种指标排放方面不尽人意，仍有许多改善的空间；三是企业对特殊岗位人员（例如危险化学品管理等职位）的培训不足、管理不严也会造成环境污染事故的发生。

由于此次报告调查是以问卷访谈为主，没有对企业的“三废”进行实际检测，无法给出确实的数据。但是我们提醒光伏产业界，除了重视多晶硅的能耗和“危险化学品”问题以外，还要吸取晶科能源的教训，注意其他环节中的污控管理，要将常规的污染物和工艺过程也纳入到考核指标体系中，同时建议政府加强监管。太阳能行业是阳光的产业，应当尽全力成长为零污染或极少污染的产业。

## 新闻背景

[ 晶科能源：排污导致海宁“癌症村” ]

2011年9月15日，浙江海宁袁花镇红晓村的部分群众聚集在晶科能源的工厂门口，就当地小河出现死鱼的现象向该企业“讨说法”。随后，当地村民举报“排污导致31人患上癌症，6人患上白血病”。

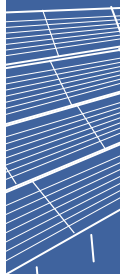
虽然晶科坚称“排污导致村民患癌”为“谣言”，但其污染事实，也因此大白于天下。

此后海宁市环保局初步调查宣布，晶科能源存在污染，其部分污染物进入了河流，其中的含氟量超标10倍。随后，晶科被处以47万元的罚款，并停产整顿。

成立于2006年12月的晶科能源，起家于江西上饶，注册资金2.9亿美元，是国内名列前茅的太阳能下游产品生产商，堪称清洁能源领域的佼佼者之一。不过在光伏行业正逢低谷之时，浙江晶科能源控股有限公司却陷入环保门，引发了公众对号称清洁能源的光伏行业污染的质疑。（摘自《南方周末》）

## 新闻评论

这些污染事件发生的背景，是整个光伏产业的大跃进式发展，政府缺少对光伏生产的环境监管。







## 4 能源消耗与碳足迹

本报告中，先通过计算光伏产业链从多晶硅生产到系统组装的能源消耗得到每瓦光伏系统的综合单位能耗，再计算光伏的发电量，比对得到光伏发电产品的能源回收期，也就是光伏产品从原材料到最终成品过程中的能源消耗，通过多久的发电使用带来的化石能源节约可以两相折抵。光伏发电的碳足迹也可以如此计算。

比较光伏发电与化石能源发电的碳排放量，可以明显的看出光伏发电的碳足迹仅为化石能源发电的 1/10 到 1/20，是真正的清洁、低碳能源。

### 4.1 晶体硅电池光伏发电产业链能耗

根据国内光伏产业的能耗水平，提出以下估算。不包括从硅砂到冶金硅的能耗。以行业的平均水平：8 吨硅料生产 1MW 硅片，计算从多晶硅开始到光伏系统整个产业链的能耗为 1.032-1.658kWh/Wp<sup>1</sup>（见表 8、图 9）。

<sup>1</sup> 8 吨硅料生产 1MW 硅片，也就是 1kg 多晶硅能够生产 125W 硅片，计算从多晶硅到硅片的累加总能耗为 89-161kWh/kg，除以 125W/kg，得到单位能耗 0.712-1.288 kWh/W，加上电池 0.15-0.2，组件 0.02，系统 0.15，等于 1.032-1.658kWh/Wp，这里能耗单位换算从 kg 到 W，考虑到物料损失的综合后数值。

表 8、太阳能晶硅电池发电产业链能耗

	多晶硅 <sup>1</sup>	硅锭	硅片	电池	组件 <sup>2</sup>	系统 <sup>3</sup>
单位 能耗	80-150 kWh/kg	7-9 kWh/kg	2 kWh/kg	0.15-0.2 kWh/Wp	0.02 kWh/Wp	0.15 kWh/Wp
总能耗 占比	56-72%	4-5%	2-3%	12-14%	1-2%	9-20%

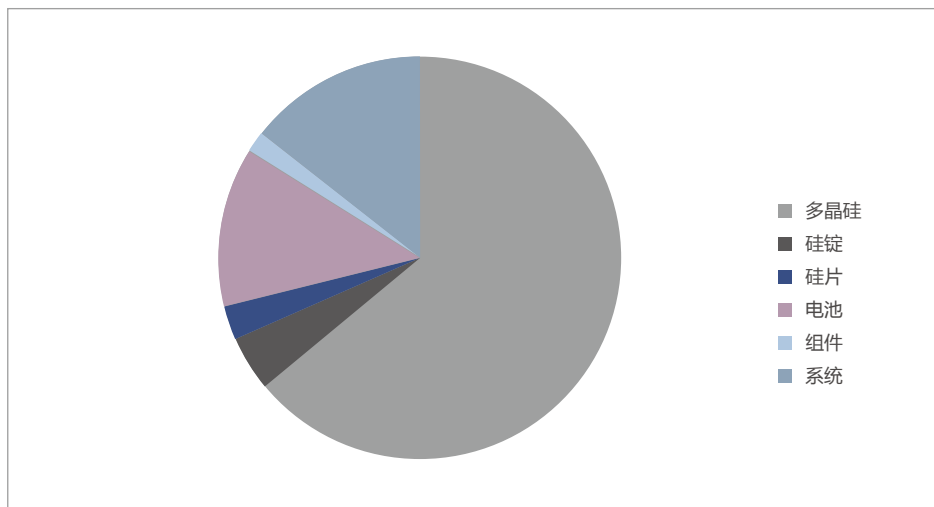


图 9、光伏产业链能耗水平

## 4.2 光伏发电的碳足迹

按照国家发改委公布的《2011 中国区域电网基准线排放因子》采用华东区域电网的排放因子数值，取边际排放因子（OM）和容量边际排放因子（BM）平均值：0.74945tCO<sub>2</sub>/MWh。根据上面的测算，从多晶硅到系统的能耗为 1.032-1.658kWh/Wp，则光伏发电的碳足迹为 0.77-1.24 × 10<sup>-3</sup> tCO<sub>2</sub>/Wp

光伏发电系统的能量回收期 = 制造光伏系统的能耗 / 光伏系统年发电量。

按照中国平均太阳能有效峰值时数年平均发电为 1300 小时计算即 1.3kWh/Wp/ 年，光伏发电的能量回收期为 0.8-1.3 年，而一般光伏发电系统的使用寿命是 25 年，也就是说，光伏发电系统在之后的近 24 年中都是零碳排放的。

### ● 每度电的碳排放量

根据上面计算，取光伏发电的碳足迹最高值 1.24 × 10<sup>-3</sup> tCO<sub>2</sub>/Wp，假设晶硅太阳能电

<sup>1</sup> 按照《准入条件》多晶硅的单位能耗低于 200kWh/kg，这里计算不采用国家标准，而取目前行业能耗水平 150kWh/kg。

<sup>2</sup> 不含封装材料：钢化玻璃、EVA、TPT 等。

<sup>3</sup> 含并网控制逆变器、电缆、开关、支架、仪表等的生产能耗。

池的使用寿命为 25 年，在资源较好的地区，如中国西藏、青海、宁夏等地年发电有效时长超过 1500 小时，则计算平均每度电的碳排放为 33g/kWh，在中国中部地区日照发电有效时长为 1300 小时，则其碳排放为 38g/kWh，而最差地区的有效发电时长仅有 1000 小时左右，则其碳排放为 50g/kWh（见表 9）。

表 9、不同太阳能资源条件的碳排放量

	资源一	资源二	资源三
年发电量（小时）	1500	1300	1000
1MW 电站 25 年总发电量（kWh）	$37.5 \times 10^6$	$32.5 \times 10^6$	$25 \times 10^6$
平均每度电的碳排放（g/kWh） （碳足迹为： $1.24 \times 10^{-3} \text{tCO}_2/\text{Wp}$ ）	33	38	50

表 10、光伏发电与化石能源碳排放对比

能源类型	燃煤发电	燃油发电	燃气发电	光伏发电
排放因子 <sup>1</sup> ( $\text{tCO}_2/\text{MWh}$ )	0.7967	0.5250	0.3776	-
二氧化碳当量 $\text{CO}_2\text{-eq}(\text{g}/\text{kWh})$	796.7	525	377	33-50

根据上述计算，假设取光伏发电最高碳足迹值，晶硅太阳能电池光伏发电的碳排放为 33-50g/kWh。而煤电的碳排放为 796.7g/kWh，燃油发电的碳排放量为 525g/kWh，燃气发电的碳排放量为 377g/kWh，这些化石能源是光伏发电碳排放量的 10-20 倍，因此光伏发电是真正的低碳能源。

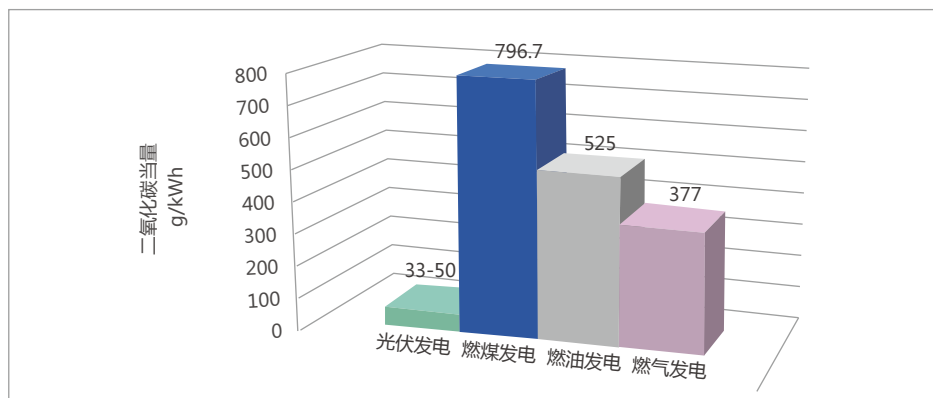


图 10、光伏发电与化石能源全生命周期碳排放比较

<sup>1</sup> 2011 中国区域电网基准线排放因子



# 5 清洁生产技术与经济可行性分析



在光伏行业中，采用清洁生产技术不但能使企业达到国家各项环保标准，还有助于公司持续降低成本，在行业中取得更强的竞争力。例如，在多晶硅提纯环节中用冷氢化替代热氢化，可以降低反应温度需要，提高三氯氢硅转化率；在硅锭/硅片原材料环节，自行回收切割液体和浆料，能够降低成本；采用金刚线新技术替代钢线切割，可以提高钢线的使用效率，摆脱对切割液的依赖，具有环保和经济双重效益。

在这部分里，我们想通过对不同环保技术的分析来指出升级清洁生产技术的经济可行性，从而突出清洁生产在企业发展过程中的重要性。

## 5.1 清洁生产与多晶硅生产成本

### 5.1.1 多晶硅成本分析

经过计算，多晶硅生产环节中电力成本占总成本的比例最高，为 36% 左右，其电耗约为 80-150kWh/kg 左右，其次为折旧成本占 30%，原材料成本占 17%，主要原材料包括硅粉、氢气、氯气（TCS 合成）等，人工成本占 8%，其他占 9%（见图 11）。这几部分成本中，电力成本下降空间最大。目前国内多晶硅生产企业能耗多在 150kWh/kg 左右的水平，而国内的一些先进企业的能耗已经控制在 80kWh/kg 以下。

电耗下降主要依赖于冷氢化技术的广泛应用。多晶硅提纯产生大量的副产物，如四氯化硅、盐酸、氢气等，这些副产物的综合利用水平，决定着高纯硅材料生产的效率和成本。若要副产物得以全部回收利用，必须依靠四氯化硅氢化技术以及还原炉系统设备、氢化系统设备等满足连续稳定生产的工艺要求。这就是国外普遍使用的“闭路循环”技术。从降低成本角度出发，燃气和其他成本可以通过扩大规模来降低，产生规模经济效益。水蒸气可以在内部通过热电厂方式产生协同效应也可以回收利用，降低相应的成本。

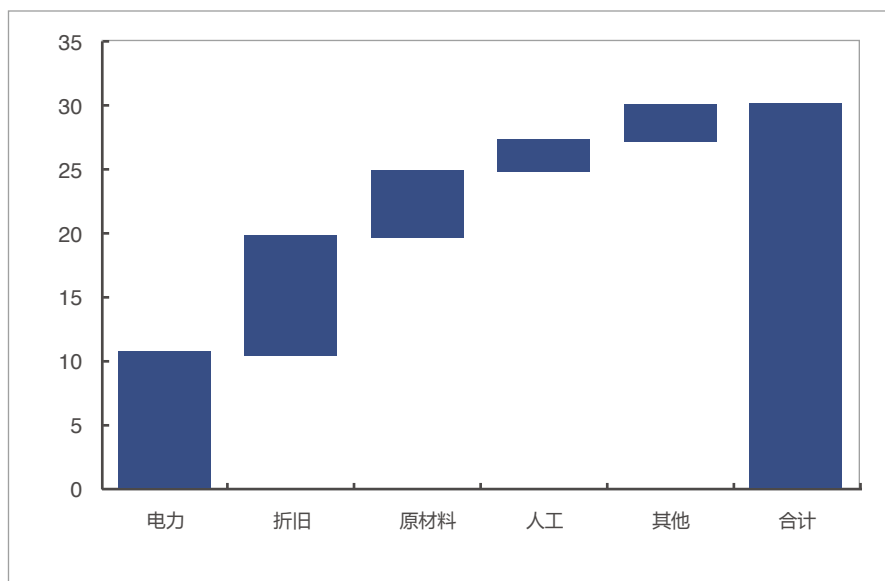


图 11、多晶硅成本分析<sup>1</sup> (单位: 美元/kg)

<sup>1</sup> 30 美元/kg 是取行业平均成本，若考虑先进企业，如使用冷氢化技术，而且生产规模在 3 万吨以上的成本应该低于 20 美元/kg。

### 5.1.2 热氢化与冷氢化技术对比

根据以上的分析，冷氢化技术是有效降低多晶硅生产成本的技术。改良西门子法下多晶硅生产能耗 80-200kWh/Kg，生产成本 18-45 美元 /Kg，企业间差距很大，除生产规模之外，主要是各企业在改良西门子法的生产环节选择使用传统的热氢法技术还是使用冷氢化技术，在多晶硅生产成本上就可以相差 10 美元 /Kg。原因在于热氢法的反应温度高，需要 1000 度以上的高温，而从硅到三氯氢硅一次转换效率只有 15%，企业通常需要从外采购三氯氢硅，致使多晶硅生产成本较高，冷氢法反应温度仅需要 300-500 度，一次三氯氢硅合成效率达到 25%，如表 11。

表 11、冷、热氢化技术能耗以及转化率对比

	需要温度（度）	一次转化率（%）	能耗（kWh/kg）
热氢化	1000	15	4
冷氢化	300-500	25	0.8

预计未来 5 年多晶硅生产能耗将降至 70kWh/kg，实现电耗成本进一步下降。电耗下降主要依赖于冷氢化技术的广泛应用，目前国内的冷氢化设备实际运行率在 60% 以下，与国际平均水平 90% 还存在一定的差距。其原因主要是国内大多数企业的生产工艺还比较落后，要想通过技术改造，实现冷氢化生产需要大笔资金投入，以产能在 2 万吨左右的乐山电力为例，冷氢化技改项目预计总投资 7.59 亿元，巨大的技改投入使众多企业望尘莫及。

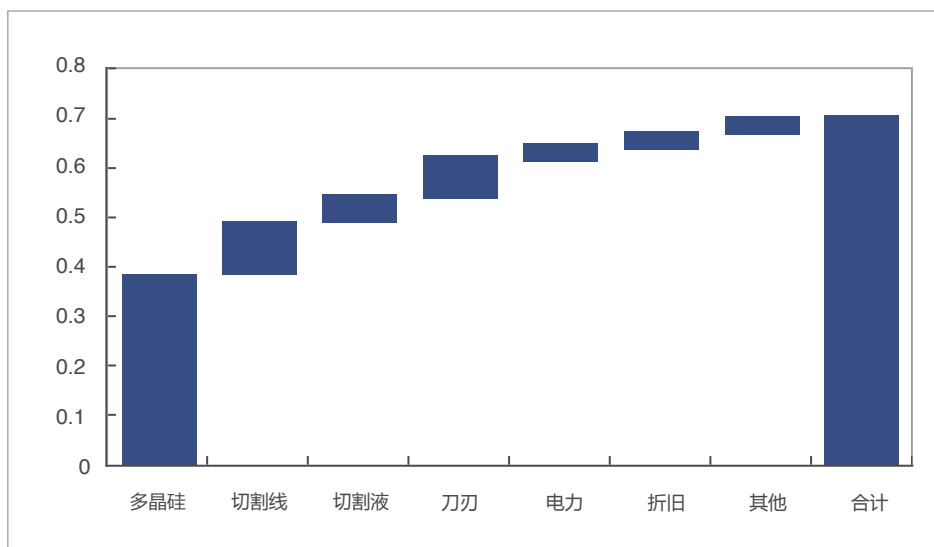
## 5.2 硅片与清洁生产

### 5.2.1 硅片的成本分析

硅片的成本中，多晶硅成本占比约为 55%，切割线、切割液和刃料总占比为 33%，电力、折旧及其他占 12%（图 12）。其中，使用金刚石线可以提高效率，同时节约成本；浆料内部回收再利用也能降低硅片的加工成本。铸锭热场改造，使用大尺寸坩埚，可以提高铸锭合格率，降低能耗。

此环节中，切割液的排放是液体废弃物中化学需氧量的主要来源。通过对切割液的回收使用，能够降低废水排放，从而削减处理成本。而且，通过使用金刚线切割，还能够避免使用切割液，虽然金刚线在成本上不具有太大优势，但因为能不使用切割液，不但能减少切割液的使用成本，还节省了大部分的废水处理成本，而且对环境有利，使它成为切割线的发展方向。



图 12、硅片加工的成本分析<sup>1</sup> (单位: 美元/瓦)

### 5.2.2 废砂浆的回收利用

在钢线切割的过程中，磨碎的晶硅颗粒与钢线上的碎屑，碳化硅颗粒混杂在聚乙二醇切割液中，形成废砂浆。通过对旋转物理工艺实现对切片砂浆中硅粉的最大化去除，然后固液分离，对聚乙二醇、碳化硅微粉进行再次回收。提高砂浆中旧砂的使用比例，回收切割液可以降低砂浆使用成本。

#### 成本估算：

砂浆使用量为 325kg/刀；  
 砂浆中砂液的比例为 0.95 : 1；  
 新砂价格为 25 元/kg；  
 回收砂价格为 11 元/kg；  
 每刀需要消耗砂 158kg；

按照 7 : 3 比例计算，切一刀的成本为：

新砂价格 (元)	回收砂价格 (元)	总计 (元)
2775	521	3286

<sup>1</sup> 取 0.7 美元/W 的行业平均水平，先进企业的成本可以做到 0.5-0.6 美元/W 以下。因为硅片的清洁生产技术在逐步应用和推广且主要影响硅片成本的因素是多晶硅价格，此外类单晶技术和大铸锭炉也会使硅片成本下降，预测 2012 年硅片的平均成本可以下降到 0.6 美元/W 以下。

按照 6 : 4 计算，切一刀的成本为：

新砂价格（元）	回收砂价格（元）	总计（元）
2370	695	3065

若新砂与回收砂比例由 7:3 提高到 6:4，则每刀可以节约成本 221 元（见图 13）。

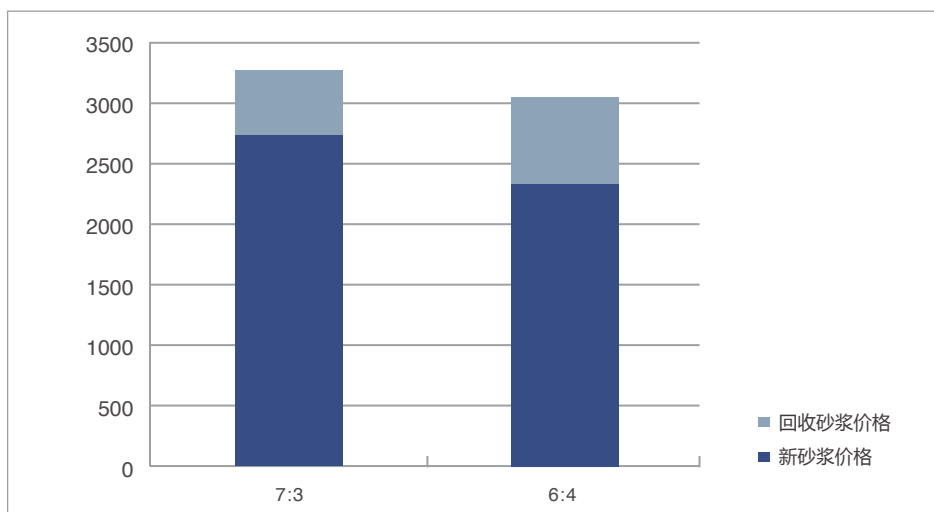


图 13、不同比例使用回收砂浆的成本对比（单位：元）

经过走访企业得知，每生产 1MW 的硅片，约消耗 30 吨的切割液，若新旧切割液比例由 7:3 提高到 6:4，则每生产 1MW 的硅片可以节约 30 万元。

切割液中使用旧液的比例会越来越多，2010 年新旧液比例约为 7:3，未来三年可达到比例依次为 6:4，5:5，4:6。旧液使用的占比增加及回收效率的增大都有益于硅片成本进一步降低，同时亦能够降低“三废”排放。





# 6 清洁生产的必要性

## 6.1 企业发展的基本原则

如果生产“清洁产品”的企业其生产环节不是清洁的,那这个“清洁产品”就是徒有虚名。任何行业生产过程中都会产生一些对环境有害的废弃物,如果不做管理或者监控的话,会对环境产生负面影响。而且只要是工业生产,都应该把清洁生产作为企业发展的原则性问题,光伏行业更不应该例外。

众所周知,正是得益于世界各国对清洁能源发展的决心,光伏行业才能迅速成长。光伏行业不仅要为世界提供清洁能源,其本身的生产也应该而且必须是清洁的。一旦光伏企业造成了环境问题,将会对行业健康及其可持续发展带来负面影响。从这个意义上说,清洁生产不能局限于企业社会责任的范畴,而是企业可持续发展的方向性问题。

可以说,清洁生产是能满足企业自身发展需求、自然环境以及客户要求等多赢的举措。太阳能作为一种清洁能源,其转化和使用也应该是清洁的,这样才能凸显其优势,从而获得更大市场。这也是全社会给光伏行业提出的更高要求。而技术环节也已经不是实现目标的障碍。光伏行业应该也有能力在现在的环境排放标准下进行升级改造并严格执行环保标

准，让光伏行业的清洁生产不再成为被各界诟病的一大顽疾，让太阳能发电真正实现清洁化。

## 6.2 节约成本，提高竞争力

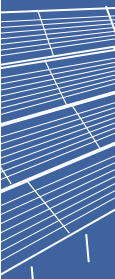
从短期看，光伏产业发展仍然依赖于各国政策的扶持，但随着技术进步、能耗的进一步下降，光伏发电的成本也会逐步降低，在用户端达到平价上网。因此光伏行业清洁生产技术进步和成本的下降将为行业的发展带来持久的生命力。

通过实施清洁生产，产业链中的各种物质能够得到充分的使用，降低生产成本。多晶硅生产采用改良西门子法，实现四氯化硅的闭路循环，使原料充分利用，冷氢化技术正在取代热氢化技术，多晶硅还原炉不断升级，多晶硅铸锭炉也越来越大，这些技术革新既降低了单位能耗也降低了生产成本。金刚线切割将减少切割液的使用，一旦技术成熟，成本降低趋势将不可避免。在“成本为王”的残酷的竞争中，对产品的简单加工和粗放型制造不再能获取更高的附加值，只有将成本降到最低才能使企业具有更强的竞争力。

清洁生产既是挑战也是机遇。以清洁生产为目标，不但不会限制企业的发展，反而可以帮助企业实现产业升级。例如，2011年第四季度，多晶硅的市场价格跌幅超过30%，价格下降至30美元/kg，而国内多数多晶硅企业的生产成本为40美元/kg，生产成本倒挂导致多数企业停产开始技术改造。只有少数几家企业受益于清洁生产技术带来的低成本，能够在价格大战中逆势而上，凸显其成本的竞争优势。清洁发展是中国光伏产业未来发展必然选择。

## 6.3 应对绿色贸易壁垒

随着政府应对气候变化政策逐步细化和强化，建立碳排放管理体系将成为企业在市场中竞争的有力手段。未来主要的温室气体减排地区及国家将采取更多和更加严格的单边碳税或减排政策，这将会影响到国家间的贸易往来，特别是对中国带来影响。比如法国，现在已经要求其国内销售的光伏产品出示环境影响以及能耗指数认证，并作为上市销售的必需条件。而德国、西班牙以及意大利等光伏市场也很重视产品在全生命周期内对环境的影响。作为外销型的行业，由于欧盟更加关注产品碳排放，有可能采取比较严格的措施对部分产品提出碳排放要求，甚至形成贸易壁垒。企业需要积极应对这种趋势，提早开始对产品开展碳足迹盘查与认证工作，将排放影响延伸到产业链各个环节，直到消费者终端，满足绿色消费需求。







# 7 主要问题

## ⊙ 末端治理，治理费用高，效果不理想

在晶硅电池方面，国内生产能力 70% 以上是 2007 或 2008 年以后建成的。一线的企业在完成了工艺和效率的提高之后，清洁生产却仍旧停留在末端治理阶段，并没有将清洁生产的概念从源头做起，升级换代生产技术，使得治理费用高，而效果却并不理想。对很多企业而言，“末端治理的清洁生产”的投入较大，成本高，花费大，受益少，还可能影响企业发展，也不是“燃眉之急”，因此未能全面推行。

## ⊙ 缺少监管以及统一的光伏行业生产标准

从目前看，国内的光伏行业发展虽然比较快速，但也还处于前期的无序和混乱中，行业没有统一的光伏行业生产标准，推行先进清洁生产技术的企业不多。加之各地方政府在各地地方大力发展新能源过程中，众多光伏产业项目匆匆上马，政府有关部门以及工业园区自身为了招商引资降低“三废”排放标准，或者不严格执行相关环境标准，配套污染治理设施不到位，使得光伏行业存在一定环境隐患。这不但有损于光伏行业的“清洁能源”的本质，也让行业自身蒙受了很大损失。“晶科”的污染事故就是在这样的发展背景下发生的。

同为可再生能源，风电发展的经验可以为光伏行业提供借鉴。在经历过近五年的无规范无标准的发展后，设备以及电厂质量都受到了一些质疑。直到去年，风电行业才连续发布了多条行业标准，力图规范行业发展。而光伏并没有有效吸收风电发展的经验，目前仍没有执行行业标准和规范，中央地方主管部门以及行业自身都是有责任的。

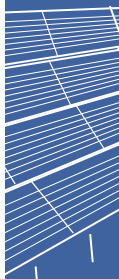
## ④ 多晶硅行业存在的主要问题

在清洁生产方面，多晶硅产业国内先进的企业已经达到了世界领先水平，以江苏中能为例，主要标志一是多晶硅单位能耗水平已经降低到 80kg/kWh，二是生产工艺过程基本实现了循环利用。但是中国的大多数多晶硅企业还与先进水平存在一定的差距，主要原因有三点。

第一，发展前期的供不应求使得企业忽略环保标准和清洁生产。在产业发展初期，随着国外市场的需求逐渐增加，国内光伏电池产量急速上升，原料多晶硅也供不应求，但货源主要依赖进口，市场价格也水涨船高。国内市场供需矛盾，导致了多晶硅产能扩张，一批多晶硅生产项目在缺少相关技术和环境标准下，也没有考虑到选址、能耗、环保、规模等因素，急于上马开工，处于治污不达标和能耗偏高的阶段，不仅制造成本高，“三废”问题也相当严重，因此也出现了很多环境问题。

第二，先天缺陷，工艺和装备落后。多晶硅行业在中国起步较晚，多数企业从 2007 年才开始进入这个行业，其生产线设计主要依靠从德国、美国或俄罗斯引进，设计产能多为 1500 吨/年。由于国外核心的工艺和设备不对中国出售，比如尾气和废料的循环利用、降低能耗等，造成引进的产能相对落后，升级工艺流程和改造设备只能靠国内企业自身努力。而国内的光伏企业大多资历尚浅，对于环保技术升级换代或者技术革新等问题尚缺乏经验。加上很多二三线制造商本就没有光伏设备生产的背景，进入行业后对企业管理和技术使用还没掌握，这也造成了国内光伏清洁生产与国外存在一定差距的结果。

第三，市场竞争激烈，落后产能面临更新换代和淘汰两种选择。2011 年第四季度，多晶硅的市场价格跌幅超过 30%，价格下降至 30 美元/kg，而国内多数多晶硅企业的生产成本为 40 美元/kg，对大多数多晶硅企业来说难以维持下去，收回成本成了一个很现实的问题。国内 70 家多晶硅厂，能维持生产的不到 10 家。对于本就面临生产成本极高的落后产能，这种企业在技术和工艺上的先天缺陷很难弥补，如果要对其进行改造，改造费用又相当大，被兼并重组的可能性更是微乎其微，很有可能会直接被市场淘汰。对于有潜力升级换代的产能，鉴于其本身成本控制就比较理想，对其进行升级的投入产出比企业是可以有较高预期的。在这个阶段，落后产能面临着要么被淘汰，要么升级换代的处境。市场环境的恶化迫使企业停产技改，虽然对企业来说是危机，但是从长远来看，还是促进了行业的进步。







# 8 建议

## ⊙ 清洁生产从源头做起，努力实现全产业链清洁生产

企业应将清洁生产的概念和标准融入产品的设计和工艺流程管理之中，从源头上减少或者避免“三废”的产生。对生产中的电气、暖通、动力、用水等系统进行优化改造，提高能源利用效率，减少污染排放，建设资源节约型和环境友好型企业。特别是对于多晶硅行业，应当通过技术改造和创新，实现全闭路的循环生产，淘汰落后生产技术，将有毒有害废弃物的排放降到最低。

对于难以避免的排放，企业应当制定和完善管理制度，对生产末端产生的废气、废水及废渣进行及时有效回收处理，并将危险化学品或者废弃物交由有资质的部门或者企业管理，不达标的不排放，杜绝生产中排放物对环境造成危害。

## ◎ 环保部门应严格执行环保标准，加强监管

“先发展后治理”的发展模式已经被证实是不可持续的，但由于在中国发展模式留存已久，根深蒂固，使得很多企业甚至相关部门都不把环境标准作为企业发展的优先事项。加之环保部门在政府体系中的弱势，要严格执行环保标准并进行监管、惩罚难度就更大。光伏行业也存在着这样的问题。

要让光伏产业生产出真正的清洁能源，需要企业严格执行环境标准，政府加强监管力度、管理职能，对存在超标排放、偷排偷放等问题的工厂应予以高额处罚，责令限期改正；对治理设施运行不正常的工厂，应责令停产整顿，限期改正，逾期未完成的依法关闭。

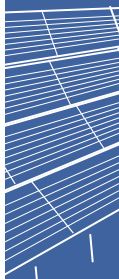
## ◎ 制定并定期更新清洁生产的标准，建立认证体系，定期发布年度清洁生产报告

《多晶硅行业准入条件》是中国第一份也是唯一一份对光伏企业进行要求以及约束的标准，虽然2010年底才颁布，但现在的生产技术以及规模与“条件”制定时早已不可同日而语。行业标准应该与行业发展现状同步，否则标准就无法发挥其规范行业发展的作用。对于标准的更新，也是引导行业发展的有效手段。

行业中的领先企业有责任做出表率，主动发布环境影响信息、产品能耗水平及碳足迹，充分发挥其领导作用，让社会了解光伏产业生产的真实情况。同时，政府或行业协会需要制定关于光伏行业更全面的清洁生产标准，建立相关认证体系，将清洁生产标准和认证作为市场的准入标准，并对社会发布年度清洁生产报告，以期公开透明的披露各个环节的环境指标和能耗水平，从全生命周期的角度对光伏行业清洁生产以及能耗水平进行评价和分析，并指出未来的发展方向。企业有责任配合行业协会以及政府有关部门报告环境影响信息，能耗和碳排放水平，让这些识别、统计、分析和管理工作做到可评估、可监测和可核实。

## ◎ 推动科技进步，实现清洁生产的可持续发展

光伏生产及利用要实现长期可持续发展，需要政府加大科技投入，支持和帮助企业对生产工艺、关键技术及生产设备进行更新改造，提高能源效率，控制污染物排放，最大限度的减少对环境、资源的影响。企业应该从研发抓起，在研发新工艺或是技术改造时，使用清洁原料，采用先进工艺和设备，降低生产能耗，调高生产效率，节约生产成本。





## 9 主要结论

在全球范围内，清洁生产被看作是污染防治的最佳模式。与污染发生后进行末端治理不同，它倡导从源头做起、预防为主、全过程控制，最终实现节能降耗、减污增效。因此，要摆脱简单低价制造的印象，提升产业竞争力，清洁生产已是中国光伏产业必须选择的前进道路。

### ④ 清洁生产是企业发展的基本原则

企业有责任让太阳能光伏发电成为名副其实的清洁能源。同时，需要政府或行业协会制定关于光伏行业清洁生产的标准，建立相关认证体系，发布年度清洁生产报告，公开透明的披露各个环节和方面能耗水平和碳排放信息。政府要显示决断力，严格监管企业的环境行为，同时也要安排帮助企业提高能源效率，控制污染物排放，最大限度的减少对环境、资源的影响。

## ◎ 清洁生产已经不再是制约光伏产业发展的瓶颈

中国从上世纪 80 年代开始对光伏发电进行研究，距今已有近 30 年的时间。作为世界最大的光伏发电装备制造国，中国已经积累了一定的技术以及专业性，虽然对核心技术的掌握还存在难度，但获取的渠道是开放的，清洁生产技术已经不再是也不应该是制约光伏发展的瓶颈。

从现状来看，之所以光伏清洁生产问题会成为媒体和公众的关注点，其主要原因并不是技术本身，而是企业意愿、管理和政府监管出现了漏洞。要解决清洁生产的问题，企业首当其冲，相关的政府部门也责无旁贷。

## ◎ 与化石能源相比光伏发电是真正的清洁低碳能源

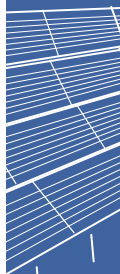
一般光伏发电系统的使用寿命是 25 年，光伏发电的能量回收期仅为 1.3 年，也就是说，光伏发电系统在之后的近 24 年中都是零碳排放的。晶硅太阳能电池光伏发电的碳排放为 33-50g/kWh，而煤电的碳排放为 796.7g/kWh，燃油发电的碳排放量为 525g/kWh，燃气发电的碳排放量为 377g/kWh。光伏发电仅为化石能源发电碳排放量排放 1/10 到 1/20，还能避免化石能源发电所产生的大量污染物排放，是真正的清洁低碳能源。

## ◎ 清洁生产技术可以帮助企业降低成本，提高竞争力

清洁生产是降低成本的有效途径，是帮助企业实现产业升级的重要手段。2011 年光伏产业进入低谷，产能过度膨胀和市场需求放缓导致企业竞争加剧。虽然只有少数几家企业受益于清洁生产技术带来的低成本，但事实证明，这些企业在价格大战中逆势而上，凸显了其成本的竞争优势。其次，清洁生产在减少了环境污染的同时，也有助于淘汰落后产能，督促企业不断通过改进工艺和技术，扩大规模，提高效率，降低成本，推动光伏发电成本降低，早日实现平价上网。

### 本研究提出的可达到环保与成本双赢的关键清洁生产技术有：

1. 多晶硅生产中的冷氢化技术
2. 多晶硅生产中的闭路循环技术
3. 硅片切割使用 PEG 砂浆循环利用技术
4. 硅片切割中将钢线替换为金刚线





## 附录一

# 国内企业的案例介绍

### 江苏中能采用先进的节能降耗技术将成本降到最低

经过几十年的探索，改良西门子法已经成为多晶硅提纯规模化生产的主流。从合成到蒸馏，从还原到尾气分离，最重要的一步就是四氯化硅的氢化技术，做到百分之百的循环利用。每生产 1 吨多晶硅需要 15-20 吨的原料投入，如果不能做到循环利用，四氯化硅就变成了废物，会造成物料的损失，同时带来严重污染隐患。所以必须实现尾气的循环利用，这也是提高产量的唯一途径。

2009 年以前，冷氢化技术基本掌握在国外同行手中，不对中国出售。中国在 2009 年以前动工建设的多晶硅生成线多数是从美国和德国引进的 1500 吨的生产线，生产规模较小而且基本使用热氢化法。

江苏中能是具有比较竞争优势的企业，通过对多晶硅提纯的生产工艺技术改造，采用先进的技术，用冷氢法代替传统的热氢法，多晶硅的能耗可以降低到 80 千瓦时 / 吨，远远低于 120 千瓦时 / 吨的平均能耗水平。

就多晶硅的成本结构而言，核心的削减成本优势在于降低每千克多晶硅生产的耗电量。江苏中能的经验一是通过 1) 采用更大规模的蒸馏系统（每条生产线 10 万吨，而此前为 5 万吨）；2) 采用扩大和定制化的还原炉；3) 采用冷氢氯化反应（低温）工艺取代传统氢化法（高温），降低多晶硅生产的用电量。二是做到 99% 的四氯化硅和三氯氢硅循环利用。江苏中能建造了 50 万吨的氢化产能，可循环利用废气中 99% 的四氯化硅和三氯氢硅（二者均为多晶硅的关键原材料）。根据江苏中能的经验，多晶硅的清洁生产不仅是环保诉求，也能降低成本，是企业追求效益的内在动因。在节能降耗的同时已经将多晶硅生产成本从 30-40 美元 / kg 降低至 20 美元 / kg，拥有绝对成本优势，成为多晶硅行业的后起之秀。

## 阿特斯测算产品碳足迹

---

从 2009 年开始，阿特斯从企业社会责任出发计算光伏全产业链的碳足迹。由于当时阿特斯处在太阳能行业中后端，主要产品是电池片和组件，而光伏行业的主要排放为上游的多晶硅行业。因此，阿特斯与供应商联系，请上游供应商提供数据支撑，同时邀请国际碳核查公司做第三方认证。碳盘查从开采矿冶炼开始，涵盖多晶硅提纯、电池片的制造、组件生产至太阳能电池板生命周期结束。被访问的厂家均是国内产业链上规模较大和业内知名的企业。从采矿至光伏组件组装完毕过程中的每一个流程均进行了碳足迹盘查和计算。

国外的很多大公司都已经开始开展碳盘查项目。很多跨国公司已经将碳排放作为企业社会责任重要内容。光伏行业生产的是清洁能源，要证明太阳能在环境和资源利用上能够做到真正的清洁能源，就要看整个产业链到底是怎样的情况。阿特斯碳足迹计算向社会和客户说明了太阳能光伏发电的清洁性，光伏发电碳排放远远低于煤电、石油、天然气这些传统的化石能源。

毋庸置疑，绝大多数企业的碳核查是为其商业利益服务的。但是阿特斯发现，碳足迹的盘查帮助企业重新认识了生产流程，通过对能耗较高工艺的改进，也帮助企业以更低的能





## 附录二

# 光伏清洁生产的相关政策文件

国务院 38 号文	<p>2009年9月26日国务院发布38号文《关于抑制部分行业产能过剩和重复建设引导产业健康发展的若干意见》<sup>1</sup>。</p> <p>特别需要关注的是，多晶硅等新兴产业也出现了重复建设倾向，一些地区违法、违规审批，未批先建、边批边建现象又有所抬头。</p> <p>严格控制在能源短缺、电价较高的地区新建多晶硅项目，对缺乏配套综合利用、环保不达标多晶硅项目不予核准或备案；鼓励多晶硅生产企业与下游太阳能电池生产企业加强联合与合作，延伸产业链。</p> <p>新建多晶硅项目规模必须大于3000吨/年，占地面积小于6公顷/千吨多晶硅，太阳能级多晶硅还原电耗小于60千瓦时/千克，还原尾气中四氯化硅、氯化氢、氢气回收利用率不低于98.5%、99%、99%；引导、支持多晶硅企业以多种方式实现多晶硅—电厂—化工联营，支持节能环保太阳能级多晶硅技术开发，降低生产成本。到2011年前，淘汰综合电耗大于200千瓦时/千克的多晶硅产能。</p>
多晶硅 行业 准入 条件	<p>2010年12月《多晶硅行业准入条件》<sup>2</sup></p> <p>(一) 新建多晶硅项目生产占地面积小于6公顷/千吨。现有多晶硅项目应当厉行节约集约用地原则。</p> <p>(二) 太阳能级多晶硅还原电耗小于80千瓦时/千克，到2011年底前小于60千瓦时/千克。</p> <p>(三) 半导体级直拉用多晶硅还原电耗小于100千瓦时/千克，半导体级区熔用多晶硅还原电耗小于120千瓦时/千克。</p> <p>(四) 还原尾气中四氯化硅、氯化氢、氢气回收利用率不低于98.5%、99%、99%。</p> <p>(五) 引导、支持多晶硅企业以多种方式实现多晶硅-电厂-化工联营，支持节能环保太阳能级多晶硅技术研发，降低成本。</p> <p>(六) 到2011年底前，淘汰综合电耗大于200千瓦时/千克的太阳能级多晶硅生产线。</p> <p>(七) 水资源实现综合回收利用，水循环利用率≥95%。</p>
多晶硅 审 批 重 启	<p>2011年5月，工信部公布了“关于印发《多晶硅行业准入申请报告》的通知”，要求各地相关部门按照规定对申请企业的材料进行核实，并于7月15日前将审核结果及材料报送工信部，这标志着多晶硅项目审批将会重新启动。</p> <p>2011年10月，按照《多晶硅行业准入条件》的相关要求，由工信部牵头，组织北京有色金属研究总院、天津46所2家测评机构，开始对国内几家大型多晶硅生产企业开展行业准入现场测评。</p>

<sup>1</sup> 国务院网站：[http://www.gov.cn/zwgc/2009-09/29/content\\_1430087.htm](http://www.gov.cn/zwgc/2009-09/29/content_1430087.htm)

<sup>2</sup> 国务院网站：[http://www.gov.cn/zwgc/2011-01/24/content\\_1791452.htm](http://www.gov.cn/zwgc/2011-01/24/content_1791452.htm)

# 致 谢

在本项目研究的过程中，项目组得到了众多企业的大力支持和热情参与，提供了第一手的宝贵资料，在此一并表示感谢。

- 
- 保利协鑫能源控股有限公司
  - 江苏中能硅材料科技有限公司
  - 江苏协鑫硅材料科技开发有限公司
  - 尚德电力控股有限公司
  - 常熟阿特斯阳光电力科技有限公司
  - 天合光能有限公司
  - 赛维 LDK 太阳能高科技有限公司
  - 赛维 LDK 硅化学科技有限公司
  - 晶澳太阳能控股有限公司
  - 阳光电源股份有限公司
  - 北京京仪绿能电力系统工程有限公司
-

## **GREENPEACE 绿色和平**

地 址：北京市东城区新中街68号聚龙花园7号  
楼聚龙商务楼3层

邮 编：100027

电 话：+86 10 6554 6931

传 真：+86 10 6554 6932

[www.greenpeace.cn](http://www.greenpeace.cn)

---

## **CREIA | 中国资源综合利用协会 可再生能源专业委员会**

地 址：北京市西城区车公庄大街甲4号物华  
大厦A2106室

邮 编：100044

电 话：+86 10 6800 2617/18

传 真：+86 10 6800 2674

邮 箱：[creia@creia.net](mailto:creia@creia.net)

[www.creia.net](http://www.creia.net)

---