

大力发展“第三代”光伏发电技术， 应对“碳关税”的挑战

何祚庥

(中国科学院理论物理研究所, 北京 100086)

摘要: 简要介绍了国内外光伏发电技术研究现状和发展趋势, 重点介绍了国内外新的“第三代”光伏发电技术, 即“4倍聚光+跟踪+太阳能炼硅+晶体硅(p型或n型)+薄膜”的光伏发电技术。利用这项技术研发, 建造了多个商业化光伏电站, 在太阳炉熔炼单晶硅和难熔金属等应用方面也取得了很大进展, 并已出口进入国外市场。

关键词: 光电板; 晶体硅; 太阳炉

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2009)07-0001-07

Meet the Challenge of “Carbon Tariffs” by Developing the Advanced Third Generation Photovoltaic Panels to Generate Clean Power

HE Zuoxiu

(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: It is pointed out that the current solar photovoltaic panels are developing rapidly from the first generation photo cells, which are based on the standard crystalline silicon, to the second generation photo cells using different thin films. However, the third generation has become available recently by combining the few times concentrator and sun-tracking and wafer made from crystalline silicon and silicon film. With this new technology, the market price can drop to 0.4~0.5 ¥/kW·h.

Key words: photovoltaic panel; crystalline silicon; solar furnace

1 前言

我国无疑应迅速决策大力发展太阳能, 把发展太阳能提高到国家发展战略高度, 一方面是为了应对国际金融危机, 另一方面也是为了回应发达国家为扼制我国而发起的“征收碳关税”的挑战。

最近, 美国总统奥巴马一再宣称: “在开发、生产、利用和节约能源的新技术方面, 没有什么比创新更重要”。

应对“碳关税”的重要措施之一, 是大力发展光伏发电技术, 要在10~15年间, 将光伏发电成本下降到可以和火力发电相竞争的水平。

从国际发展的态势来说, 当前光伏产业正由晶体硅发电为核心的“第一代”技术, 向硅薄膜或其它薄膜(如碲化镉, 铜铟镓硒等)发电等“第二代”技术转变。由于

薄膜的厚度仅为几个微米, 所用材料仅为价格十分昂贵的晶体硅的1%。所以, “第二代”技术的发电成本, 一般约为“第一代”技术的1/2。

但是, 时代又在前进。

现在光伏发电技术, 又出现了“第三代”技术。这就是中国科学院理论物理研究所特聘研究员, 陈应天教授所开拓的“4倍聚光+跟踪+太阳能炼硅+晶体硅(p型或n型)+薄膜”的光伏发电技术。^[1-4]

我个人认为, 这是当前最先进、发电成本也最低廉的光伏发电技术。

下面简略地介绍一下陈应天教授及其团队在太阳能光伏发电技术方面, 所获得的成就。

2 光伏发电技术的突破

当前“4倍聚光+跟踪”的光伏发电技术有较大突破, 其成本已下降到平板光电池的1/3, 发电成本也下降到0.51元/kW·h。

收稿日期: 2009-07-14

通信作者: 何祚庥, 男, 1927年生, 研究员

传统的光伏电池是将光电池做成平板, 固定放在屋顶或墙面, 或按最佳方位, 用支架排成接受阳光的阵列。优点是结构简单、易加工, 缺点是有较大的余弦损失, 每块光电池只接受一倍阳光, 利用率太低! 提高电能有效产出的办法之一: 聚光 + 跟踪。

2.1 4 倍聚光装置

图 1 是陈应天教授所发明的 4 倍聚光装置。关键在于所设计的光漏斗能够保证在一次反射的条件下, 在太阳电池表面有均匀光强的分布。

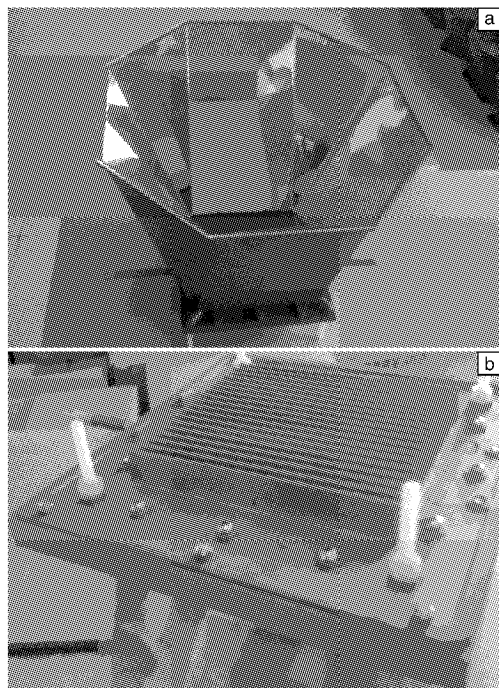


图 1 光漏斗的外形图: (a) 整体外观, (b) 部件

Fig. 1 Picture of the light funnel; (a) overall appearance and (b) parts

理论预期, 4 倍聚光将输出 4 倍电力。实际上由于反射、吸收等原因, 实测证明, 在直射光是 4 倍光强的条件下, 光电池的输出是 3.3 倍。如果再加上跟踪装置, 可比平板电池提高 30%, 发电量是 $3.3 \times 1.3 = 4.3$ 倍。如果扣去光漏斗对漫射光的阻挡(注: 漫散光一般占太阳光的 10% ~ 30%), 在干旱地区, 漫射光仅占 10%, 也就是一块光电池能产生 $4.3 \times (1 - 0.10) = 3.87$ 倍的电力; 在阴雨、多云地区, 一块光电池将能产生 $4.3 \times (1 - 0.30) = 3.01$ 倍的电力。

2.2 技术成功的原因

为什么这一 4 倍聚光技术能在短期内获得成功? 原因是: ①仅要求“4 倍”而不是高倍聚光, 所以可用目前市场上有充分供应, 价格较低廉的光伏电池, 不必要求有能承受 10 ~ 20 倍, 或几百倍, 但质量难以保证, 价格十分昂贵的, “特殊”的聚光电池; ②这一

光漏斗能保证太阳光在光电池表面有均匀的光强分布, 这就极大地减少了热应力的不均匀和受热量的不均匀, 带来“光漏斗”的制作和散热的困难, 如果是市场上随便买来的劣质光电池, 4 倍聚光会扭曲成“碗”; ③由于这是光的均匀“折叠”, 仅要求太阳光的垂直输入, 使“光漏斗”成为“向日葵”; 只需将地球绕太阳公转和自转的高精密的运行公式, 输入芯片, 就能将阳光垂直送进光漏斗, 不必采用“测量”和“反馈”等, 复杂而又不甚精密的控制方案, 也大幅度降低了跟踪成本。

图 2, 3 是发电功率为 150 W 的样机。



图 2 李政道教授在进行现场指导

Fig. 2 Professor Li Zhengdao was making a guidance

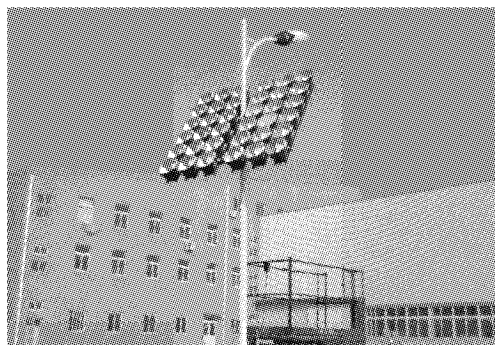


图 3 多倍聚光发电可以用在路灯上既美观又可靠

Fig. 3 Multi-condenser power used in street lights

2.3 实践考验

有许多人对 4 倍聚光技术提出批评或怀疑: 如, 能否有效地散去 4 倍聚光带来的热量? 是否真的达到 4 倍的输出? 跟踪精度能否满足要求? 能否长期安全可靠地运行? 能否经受沙漠地区, 常有的狂风、冰雹、高温、骤冷、沙尘暴等恶劣气候的考验? 如何解决灰尘的清洗? 能否比平板电池有更长的持续寿命? 能否和别的聚光方案相竞争? 等等……。

对上述难点、疑点, 陈应天教授采用了一系列高新技术, 做了有针对性的回答。尤其是“光漏斗”的设计,

除了耐冰雹、强风之外，还有效地防沙、防水，有效地消除了最为困扰平板电池的热岛效应，能保证 > 25 年的使用寿命，而且易拆、易装，便于维修。

实践也已部分地做了回答。用这一 4 倍聚光技术，已在内蒙古鄂尔多斯建造了一个功率为 205 kW 小型光伏电站。已安全、可靠、持续运行了 2 年多，只在安装调试早期有千分之一、二的光漏斗需要维修！

图 4 是在内蒙鄂尔多斯正在运行的小型光伏电站的照片。

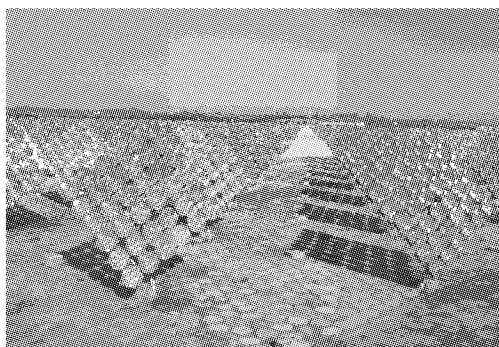


图 4 国内第一座由国家批准的在鄂尔多斯正式运行的商业化的光伏电站

Fig. 4 The first photovoltaic power station in Ordos, operating formally and commercially

2.4 改进

近来，这一 4 倍聚光技术，又做了大幅度改进。已在蚌埠研发了一台直径为 35 m 的，峰值功率为 50 kW，50 KWP 的光伏发电机。这一样机所用结构材料更少，占地面积更小，控制更简单，成本也更低。这一 4 倍聚光单元，已获得欧洲 TUV 长达一年之久的测试，认为可销售到欧洲市场。据我们所知，这是世界上第一例聚光漏斗，通过 TUV 测试。现在已接到国外大批订单，已出口国外市场。

极有兴趣的是：最近，在蚌埠地区出现大风暴、大冰雹，一个厘米直径的冰雹砸向 4 倍聚光漏斗，全部结构安全运转，安然无恙。下面是在西班牙安装的 50 KWP 光伏电机的跟踪系统：

图 5, 6 是在西班牙安装和运行的 50 KW 转盘式光伏电机的照片。

2.5 成本

更令人感兴趣的，是 4 倍聚光技术的发电成本。这涉及 50 KWP 光伏电机的使用寿命。由于一块光电池已能发出 4 倍电力；这一 50 KWP 并网光伏电机包括利税、土地、知识产权费用在内的总投资将下降到 25 000 元/kW。如果此光伏电机使用寿命是 25 年，年平均发电 1 967 h (注：这是甘肃武威地区年平均日照时

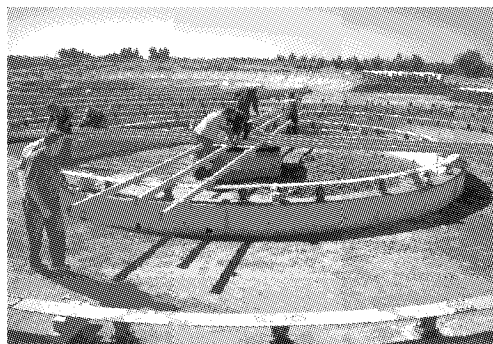


图 5 西班牙工人在紧张地安装来自中国的发明

Fig. 5 Spanish workers were installing the power equipment invented by Chinese



图 6 中国发明的大型跟踪光伏电站在西班牙正常运行

Fig. 6 Large tracking photovoltaic power station invented by Chinese, operating normally in Spain

间)，易算出以 25 年寿命计的这一光伏电机的平均发电成本，是 0.51 元/kW · h。如果此光伏电机获得 1.09 元/kW · h 的优惠上网电价，将在 12 年内回收全部成本。

最近，我们到甘肃武威地区，对陈应天所发明的 50 KWP 的转盘式光伏电站，和 863 计划支持的 500 KWP 平板式光伏电站的投资和运行做了比较性的考察，其结果如表 1 所示。

表 1 两种光伏电站的比较

Table 1 Comparison between two photovoltaic power stations

	50 KWP Rotary photovoltaic power stations	50 KWP Flat photovoltaic power stations
Investment/CNY · kW ⁻¹	26 000	~ 80 000
Generating capacity during 1 – 5 in June 2009/kW · h	4 225.7	2 718.2
Average total capacity per kW for 15 days/kW · h	84.5	54.3
Ratio	1.55	1.00

这一转盘式光伏电站不仅其单位投资仅为平板光伏电站的 1/3，而且发电量还多出 55%！

但是，这一 4 倍聚光光伏电机的光电池，现仅有

20% 转化率, 如果进一步增加到 25% ~ 30% (注: 这将是进一步研究和解决的重大课题), 上述 4 倍聚光光伏电机的发电成本, 还将进一步下降! 总之, 光伏发电技术在我国的大规模应用, 已为期不远!

3 新技术的应用

更重要的是已研发出价廉, 而聚光高达 10 000 ~ 15 000 倍的太阳炉, 温度可达 3 500 °C, 成本只有国外同类研发产品的 1/30 ~ 1/50, 已用来冶炼出太阳能级的高纯硅, 而且将为高温光冶金、光化学的研究和发展, 提供了新的工具

3.1 太阳炉

陈应天教授在太阳能领域内的重大贡献之一, 是发明了无光象主动光学理论及其技术。已利用这一理论和技术建造出价廉物美而且质量极高的定日镜。其直接应用之一, 是建造聚光达 10 000 ~ 18 000 倍的太阳炉。下面是镜面尺寸为 6 m × 6 m, 聚光 15 000 倍, 热功率高达 15 ~ 25 kW 的太阳炉。图 7, 8, 9, 10 是相关的图片。

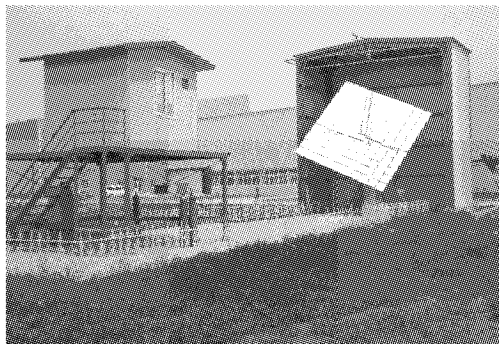


图 7 新型太阳炉

Fig. 7 New type of solar furnace



图 8 太阳炉的焦点

Fig. 8 Focus of solar furnace

已做到将 15 000 倍太阳光聚焦在某一固定方位, 在约为一个乒乓球大小的空间, 将温度上升到



图 9 利用新型太阳炉的高温熔化 15 mm 厚的钢板

Fig. 9 Plate 15 mm in thickness melted by new solar furnace

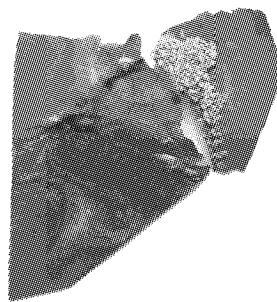


图 10 利用新型太阳炉熔化钨板

Fig. 10 Tungsten plate melted by solar furnace

3 500 °C, 其未将研发费用计算在内的成本仅约为 20 万人民币! 近来, 陈应天教授又将上述定日镜扩展为 8 m × 8 m 的镜面, 也制成相应的产品出口到国外, 其售价高达人民币 150 万元。但国外所研发的太阳炉, 其售价却至少是 150 万元的 10 倍, 在性能上也不如陈式太阳炉优越, 所以, 陈式太阳炉仍是市场受欢迎的廉价产品。

3.2 节能

近 1 ~ 2 年来, 国际市场上太阳能级多晶硅材料飞速上涨, 2008 年上半年曾高达 3 500 元/kg。由于遭受金融危机的打击, 近年来太阳能级高纯硅售价已下降到约 80 USD/kg, 集团内供货仍高达 50 ~ 70 USD/kg。原因之一, 是高纯硅的制作耗电太多, 每公斤多晶硅耗电达 250 ~ 450 kW · h! 所以, 仅电费支出就达 15 ~ 25 USD/kg, 几乎达到实际成本 30 USD/kg 的 1/2 ~ 3/4! 为大幅度减少用改良西门子法冶炼高纯硅的高耗能, 降低硅产业所产生的四氯化硅等产物的重污染, 其发展方向之一, 是用太阳能炼硅。

3.3 太阳炉应用例子

由于太阳炉是一种极好的廉价的高温光源, 已利用这一太阳炉先后在银川、鄂尔多斯和武威等地对太阳能炼硅进行了多次试验和反复改进。大量试验证明: 利用这一高温光源将能在 2 ~ 3 s 左右, 将成份纯度约为 2 个

9 的工业硅，成功地去除了最难去掉的磷和硼。

表 2 给出的是用辉光发电质谱仪，对陈应天冶炼出的多晶硅的化学成份检测报告。

表 2 多晶硅的化学成分

Table 2 Chemical composition of polysilicon($w/\times 10^{-6}$)

Element	Concentration	Element	Concentration	Element	Concentration
Li	<0.005	Cr	<0.005	Sn	<0.05
S	0.10	B	1.1	Mn	<0.005
Sb	<0.05	Ca	<0.1	Na	<0.005
Fe	<0.05	W	<0.01	Ti	<0.005
Mg	<0.005	Co	<0.005	Pb	<0.01
V	<0.001	Al	0.04	Ni	<0.01
Bi	<0.05	As	<0.05	P	0.97
Cu	<0.01	Zn	<0.05	Mo	<0.005

数据显示，磷和硼的含量(w)均是 1.0×10^{-6} ，已达到太阳能级高纯硅所要求的 6 个 9。需要略加评注的是：这里给出的数据，是多个样品中“最坏”的结果。大量的测试，均显示出这一太阳能光冶金法，产品纯度能达到 7 个 9，甚至是 8 个 9。

图 11 是在甘肃省武威地区建设中的冶炼高纯硅的装备照片。

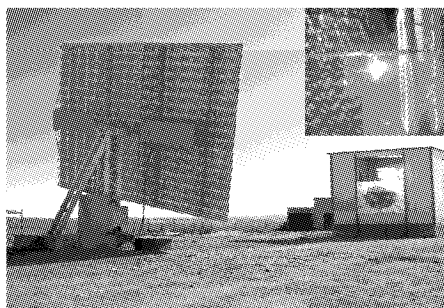


图 11 安装在中国内蒙古地区的一个新型太阳炉

Fig. 11 A new type of solar furnace of aperture size 8 m \times 8 m installed in the Inner Mongolia Autonomous Region of China. A non-imaging focusing heliostat consists of actively controlled facets impinging concentrated solar radiation onto a small secondary concentrator to achieve a 10 000 times gain in intensity within the space of a tennis ball, as shown in the upper-right corner of the diagram.

陈等人已将冶炼出的高纯硅制作成单晶硅，图 12 是世界上第一根太阳能冶炼的单晶硅的照片。

这一单晶硅的重量是 12 kg，60% 是 p 型半导体，40% 是 n 型半导体。已切成 125 mm \times 125 mm 的单晶硅片，并制成光电池，其不加特殊处理所制成的光电池的转化率可达 16.5%，而且不会因太阳光的照射，造

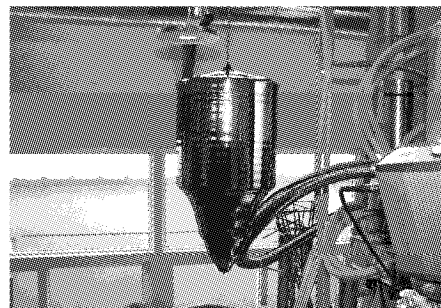


图 12 世界上第一根太阳能冶炼的单晶硅照片

Fig. 12 Photograph of the first monocrystalline melted by solar energy

成转化率的衰减！一个可能的解释是：这一光电池所用硅材料，已经历 10 000 倍太阳光的照射，所以极大地压低了光致衰减。

3.4 难点

在研发过程中，陈应天教授也碰到了一系列困难。陈应天等人本来设想利用他所发明的太阳炉所特有的“高温”，加速冶炼提纯过程的进程。试验进行不久，即发现三重困难：①冶炼温度过高将引起硅蒸汽的大量损失；②坩锅寿命太短，使用一两次，即不能再用，屡试而屡败；③极易造成坩锅污染，而且也很难找到价廉而少含杂质的坩锅。

于是，陈教授发明了一种无坩锅作业。将工业硅磨成细粉和 CaO ， Al_2O_3 ， SiO_2 等粉状氧化物和某些添加剂压铸成棒，直接放置在 10 000 倍的太阳炉里照射。利用氧化物混合物会发生由固相到液相的“相变”，可将温度控制在 1 700 ~ 2 000 $^{\circ}\text{C}$ 的范围。由于这是 10 000 倍太阳光的辐照，硅棒迅速升温熔化，液滴由硅棒剥离。为保证冶炼过程的充分完成，还需要适当延长高纯硅的冶炼时间。陈教授等人将硅棒放置在约 5.5 m 高的二层楼，利用自由落体，控制冶炼时间在 1.0 ~ 1.2 s 内，堕入某水池冷却而中止。

一个令人惊异的事实是：这一在 10 000 倍太阳光辐照下的硅棒的持续冶炼过程，竟然仅在 2 ~ 3 s 内完成全部作业。工业硅所含杂质，或者气化，或者形成氧化物，萃取到由“相变”控温为 1 700 $^{\circ}\text{C}$ 的高温氧化物混合物的液体中。

3.5 降低成本

由于这一太阳能炼硅所需持续时间仅 2 ~ 3 s，云层涨落漂移时间，往往长达十几分钟或几小时，所以这一新型太阳能冶炼法完全能走向产业化。已做到将通常西门子法耗电 200 ~ 300 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ ，降低到仅耗电 20 ~ 30 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ ，实际上是用定向凝固法，进一步提纯时所消耗的电能。

由于上述冶炼过程消耗的材料纯度是 2 个 9 的工业硅和高凝土等一类氧化物,其售价仅人民币 5 ~ 10 元/kg,所用太阳炉却没有任何消耗;所以上述试验,包括压铸成棒等工艺过程所耗费的生产成本,仅约为 20 ~ 25 USD/kg。一旦实现了这一生产过程的产业化,将完全可能下降到约 10 ~ 15 USD/kg。

3.6 优越性

不难看出,这一新方法将有如下优越性:①拥有完全的自主知识产权;②将大幅度降低能耗和制作成本;③能完全消除污染,使高纯硅成为“绿色”产业的太阳能级的高纯硅,有足够的实力应对“碳关税”的挑战;④其生产规模可大可小,从投资到生产仅有一两个星期的周期,既适合国营经济,也适合家庭作坊式作业;⑤在国际市场上将有超强竞争力,并还有大幅度成本下降的空间,(如改为 10 m × 10 m 的聚光镜)。

由于现有“4 倍聚光 + 跟踪”技术中的光电池成本,仅占全部成本的 1/3,如果这一太阳炉光照射的新型多晶硅的光冶金法得到成功,将有可能将上述使用寿命为 25 年的 4 倍聚光发电装置的发电成本,再下降 20%,由 0.51 元/kW · h,下降到 0.40 元/kW · h。所以,光伏发电产业的未来将是一片光明。

3.7 新应用领域

最近,经陈应天教授等人研究,认为这一高倍聚光的太阳炉,既是廉价的高温热源也是廉价的高强度的光源。经计算,在聚光 10 000 倍的强度下,其每秒单位面积通过的光子数高达 $1 \sim 2 \times 10^{22}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 之多,而液态硅对太阳光的吸收系数,却高达 70%。

所以,这一高强度的光子流,将激活每个正在反应中的各种化学键,而极大地加速了化学反应速度,成为“普适”的催化剂。这一“太阳炉炼硅”的成功,将开辟一个新领域,太阳能高温光化学的领域。一个显见的结果是,完全可能将上述太阳炉,用来冶炼难熔金属,或其它难以在通常高温炉内冶炼的材料。

3.8 论文成果

陈应天等人已将上述实验结果写成科学论文,已在 2009 年第 7 期的《中国物理快报》正式发表^[1]。已有某些曾获得诺贝尔奖金的国际友人评论这项成果为极富创造性的工作。最近,甘肃电力投资公司已决策应用陈教授所开拓的这一太阳能冶炼高纯硅技术进行试生产,预期年产 4 000 t 太阳能级高纯硅,总投资为 20 亿元人民币。

这一决策的一个直接的效果是:国内不少已预定要“大干快上”西门子法、硅烷法的企业,纷纷转而持谨慎观望态度。原因是:国内已上马的制作高纯硅的预期

产量,已高达 $10 \times 10^4 \text{ t}$ 之多,将在 2 ~ 3 年内形成严重的生产过剩;而一旦太阳能炼硅的产业化获得成功,这一 $10 \times 10^4 \text{ t}$ 产业将面临十分尴尬的局面!

4 讨 论

一个有巨大争议的技术“路线”问题:薄膜还是 4 倍聚光 + 跟踪?

4.1 争论点

国内外都有不少人认为薄膜电池是当前光伏产业的主流技术。理由是:①虽然目前各种产业化后薄膜电池的转化率较低,约为 6% ~ 8%,但实验室产品已高达 13% ~ 20%;表 3 是实验室所做到的各种薄膜电池已达到的转化率的简表。

表 3 各种薄膜电池的转换效率
Table 3 Conversion efficiency of thin-film batteries

Battery types	Conversion efficiency/%	Units	Remarks
Amorphous silicon solar battery	14.5 (Initial) \pm 0.7 12.8 (stability) \pm 0.7	USSC Compay USA	0.27 cm ² Area
Se-In-Cu battery containing Ga	19.5 \pm 0.6	National Renewable Laboratory USA	0.410 cm ² Area
Cadmium telluride battery	16.5 \pm 0.5	National Renewable Laboratory USA	1.032 cm ² Area
Polysilicon thin film battery	16.6 \pm 0.4	Stuttgart University Germany	4.017 cm ² Area
Ne-Si battery	10.1 \pm 0.2	Knnegafuchi Company Japan	2 μm Thick film
TiO ₂ Nano battery	11.0 \pm 0.5	EPFL	0.25 μm Area

②即令某些多个 p-n 结组成的薄膜的加工技术较复杂,原材料的大量节约总是薄膜技术的一大优势,而且,完全有可能由于“薄”,而发展出廉价加工技术。特别是碲化镉,在近期就可能降到 1.0 USD/W 的水平。

国内外还有不少人反对发展聚光技术。因为所有的聚光发电和聚光热发电系统其本质都是用“廉价的聚光材料替代昂贵的半导体材料,而当半导体材料廉价到聚光材料相近时,所有的聚光发电系统均没有生存的意义了”。下面将对现有薄膜技术和现有“4 倍聚光 + 跟踪”技术做一比较性的分析和讨论。

4.2 薄膜和 4 倍聚光技术的比较

陈应天、林文汉等人曾对薄膜和 4 倍聚光技术的优点、缺点,做了一个详细的比较。(如表 4 所示)

从上述 4 个比较的项目来看,聚光 + 跟踪和薄膜可以说各有优势、劣势。薄膜的最大优势是轻巧,“聚光

+跟踪”的最大优势，是占地面或屋顶面积只有薄膜的1/3~1/4，两者的发电成本却均为1.0元/kW·h。特别是各种建筑的“南墙”，就只能用薄膜技术发电。所以，即使聚光技术有快速进展，处在南墙上的薄膜仍将在市场占有一定份额。

但是，上述结论是在高纯硅约为1500元/kg售价的前提下做出的。但如果高纯硅售价下降到200元/kg，晶体硅光电池售价下降到5~6元/W的水平，其形势立即发生巨大变化。

表4 各种方法的特点

Table 4 Properties of methods

Methods	Efficiency of using land/W·m ⁻²	Cost/ CNY·W ⁻¹	Cost/ CNY·(kW·h) ⁻¹	Average load/ kg·m ⁻²	Maximum wind load/km·h ⁻¹
Thin-film battery	15~20	10~13	0.90	6~10	100
Flat crystalline silicon	30~40	18~22	1.80	15~20	100
Traditional tracking crystalline silicon	17~20	24~30	1.60	30~40	60~70
Condenser-tracking-crystalline silicon	20~25	20~25	1.0	35	140
Modified Condenser-tracking-crystalline silicon	50~60	20~25	1.0	35	140

4.3 性价比

薄膜的优势在于所用材料较少，材料占薄膜电池成本份额也较小。但如果高纯硅售价下降了10倍，晶体硅电池中硅材料成本也将成为不重要的份额。由于薄膜效率偏低，性能也欠稳定，一个必然的结论：薄膜电池将很难在性价比上和多晶硅电池进行竞争，除非薄膜电池的光电转化率有成倍的提高。这时，“高效晶体硅光电池+4倍聚光+跟踪”，将是光电市场上的首选。

原因是：①每瓦的“4倍聚光+跟踪”的成本和光电转化率成反比，薄膜电池在原则上当然也可以适用聚光跟踪技术来增加发电量，但如果光电转化率太低，其每瓦的“跟踪+聚光”的成本，必定大幅度增高。②理论上可以认为，“当半导体材料价格降低到与聚光材料同样廉价时，聚光系统就没有存在的必要”；实际上即令高纯硅每公斤售价降低到微不足道的水平，但制作光电池的其它专用材料，如低铁绒面玻璃、聚乙烯-醋酸乙烯酯(EVA)、薄膜晶体管(TFT)、银浆、铝浆等材料及其加工技术仍将占到约2.5~3元/W的水平，至少，在近期还很难和聚光材料相竞争，而且，聚光材料及其加工的成本，也在大幅度下降。③尤其是“跟踪”，在光电池组成的阵列中，至少将多出30%的电力，在北方或偏南地区，是不可缺少的技术。

当然，降低光伏发电成本的重要措施：进一步提高晶硅光电池的光电转化率。

5 发展方向

现在由于“太阳能炼硅”的成功，将在不久的将来，在市场上获得廉价晶体硅材料。这将可能用廉价的晶体硅，取代在薄膜电池中用到的，但价格较昂贵导电玻璃，但却同时仍能发出转化率达16%~18%的电力。现在市场上出售的n型单晶硅制作的光电池，可高达

22%的转化率，市场价格已下降到9~10元/W。但这一高转化效率仍有大幅提高的潜力。这就是下面建议的发展方向：

“n-型硅半导体(p-型硅半导体)+各种形式的硅薄膜+如有必要，再适当增加一些能吸收红外线的薄膜”。现有国内制作的光电池，绝大多数采用的是p-型硅电池的技术路线，这要比n-型硅电池少4个百分点。陈教授倡议的“太阳能炼硅”，将能供应优质、廉价的n-型的硅半导体。这也是陈式“炼硅”技术的一大优势。单晶硅能带间隙约在1.1eV，而各种形式的硅薄膜的能带间隙约在1.5~2.2eV。所以，不同性质“单晶硅+硅薄膜”的p-n结的组合，将可能将现有光电池转化率提高到25%~30%；甚而更高。这一“新型”硅电池的出现，将不仅有利于进一步推进“4倍聚光+跟踪”的发电技术，而且还能取代放在“南墙”上的薄膜。

一旦实现上述技术路线的大突破，完全可能将每度电售价下降到0.25~0.3元/kW·h。

参考文献 References

- [1] Chen Yingtian(陈应天). 从近代物理学来看我的太阳梦[J]. *Modern Physics*(现代物理知识), 2007, 19(3): 26-31.
- [2] Chen Yingtian(陈应天), Liu Chenxing(林晨星), Lin Wenhan(林文汉). *Solar Concentrator with Low-Fold*(太阳能低倍聚光器): China, ZL. 200820188217[P]. 2008-09-10.
- [3] Chen Yingtian(陈应天), Liu Chenxing(林晨星), Lin Wenhan(林文汉). *A Solar Furnace Tracking with Spin-Elevation Angle*(一种采用自旋—仰角跟踪方式的太阳炉): China, CN101368764A[P]. 2008-10-21.
- [4] Chen Yingtian(陈应天), Lin Chenxing(林晨星), Ho Tsohsiu(何祚庥), et al. Silicon Purification by a New Type of Solar Furnace [J]. *Chinese Physics Letter*, 2009, 26(7): 078103-1-078103-3.