

# 碲化镉薄膜太阳能电池技术和产业化进展

冯良桓,蔡亚平,张静全,武莉莉,黎兵,李卫,雷智,蔡伟,郑家贵  
(四川大学 材料科学系, 四川省 成都市 610064 电话: 028-85412542, 传真: 028-85412596,  
电子邮件: lh.feng@263.net)

**摘要** 本文分析了碲化镉薄膜材料及太阳能电池的优点,介绍了国内外碲化镉薄膜太阳能电池的研究状况和产业化状况,简要叙述了各个课题组和生产厂家的技术特点。

## 1.碲化镉薄膜太阳能电池的结构和特点

碲化镉因其能隙宽度为 1.44 eV,与太阳光谱的匹配较好,是理想的光电转换材料;同质结太阳能电池的理论转换效率高,达 28%。图 1 给出了一些常用半导体材料的太阳能电池的理论转换效率[3]。我们可以看到,碲化镉和砷化镓、锑化铝是转换效率最高的几种半导体材料。

在上世纪七十年代研制的是晶体的碲化镉太阳能电池。九十年代初 T.L.Chu 等的研究为后来碲化镉太阳能电池的发展奠定了基础。他们提出以碲化镉、硫化镉薄膜形成异质结太阳能电池,。值得注意的是,这两种薄膜在结构上都是多晶态。多晶薄膜和非晶薄膜在性质上有重要的不同点:结构稳定,不存在光致变化效应;能隙和单晶的相近,与晶粒尺寸、晶粒间界势垒有关;晶界势垒会影响载流子输运,也会影响到掺杂效果。在制备上,多晶薄膜需要较高的沉积温度,有时还需要进行后处理。这些特点使多晶薄膜更有利于形成太阳能电池,也使这样的太阳能电池有独特的科学问题。

图 2 展示了一个典型的碲化镉薄膜太阳能电池的能带结构。能隙较宽的硫化镉被称为窗口层,碲化镉被称为吸收层,碲化镉/掺铜碲化镉被称为背接触层。金属作为背电极。

碲化镉薄膜电池的材料消耗低,所用的几种半导体易于大面积成膜,易于制成集成组件,因而适合于规模化生产。由于作为吸收层的碲化镉有较宽的能隙,碲化镉薄膜电池能承受较高的温度环境和具有较高的抗辐射能力[1]。一些专家估计了三种重要薄膜太阳能电池的成本,见表 1[2]。看来,碲化镉薄膜电池的成本在目前和未来都是最低的。

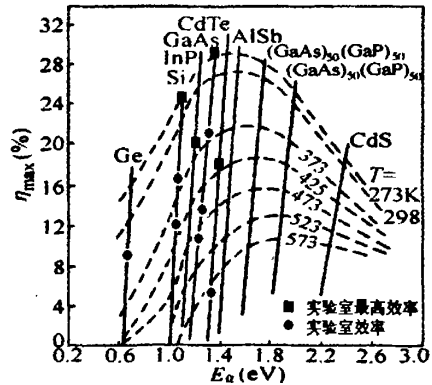


图 1 一些半导体形成的同质结太阳能电池的理论转换效率。  
红色方点为作者所加,表示现在实验室已达到的水平。

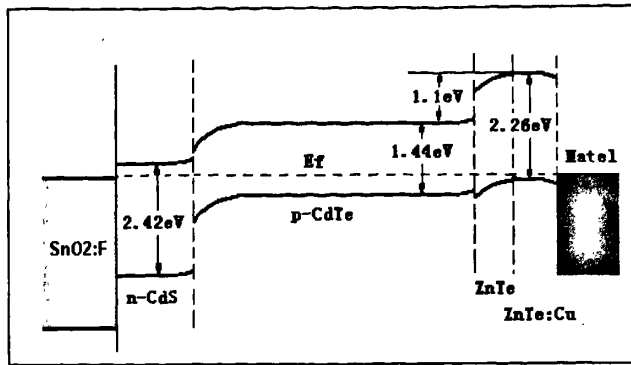


图 2 具有碲化锌/掺铜碲化锌背接触层的碲化镉薄膜太阳能电池的能带结构。

表 1 三种重要薄膜太阳能电池的成本, 设年产量为 25MW。\*铜铟硒还没有年产 25MW 生产线, 表中的成本只是一个估计。

太阳能电池种类	现在成本	未来成本
碲化镉	效率 8%, \$1.5/Wp	在效率 14% 时, \$0.2/Wp
铜铟硒	若效率为 11%, *\$1.8 ~ \$2.5/Wp	在效率 16% 时, \$0.2/Wp
薄膜硅	效率 7%, \$2 ~ \$3/Wp	在效率 11% 时, \$0.5/Wp

## 2. 国外研究与产业化状况

小面积电池研究经历了如下过程:

1994 年, 美国南佛罗里达大学 T.L.Chu 等采用 CdS/CdTe 异质结、高电导 SnO<sub>2</sub>/高电阻 SnO<sub>2</sub> 复合透明导电膜和氟化镁减反射膜, 取得 15.8% 的转换效率。1996 年, 美国可再生能源国家实验室吴选之采用 CdSnO<sub>4</sub>/CdZnSnO<sub>4</sub> 复合透明导电膜、CdS/CdTe 异质结和氟化镁减反射膜, 也取得了 15.8% 的效率。此后, 吴选之再次取得 16.4% 和 16.5% 的新纪录。

值得注意的是, 上述实验室都使用近空间升华 (Close-spaced sublimation) 的方法来沉积碲化镉薄膜。其他课题组使用电沉积、喷涂热分解、溅射等方法, 取得的效率在 11% 到 14% 之间。

欧洲是对碲化镉电池最为关注的地区, 有 6 个国家十多个课题组研究碲化镉薄膜太阳能电池。除英国 Bath 大学采用电沉积技术外, 普遍采用近空间升华技术沉积碲化镉薄膜。此外, 一个共同的技术特点是采用 Te/W<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 作背接触层。小面积电池的最高水平在 10--13% 之间。

基础性研究和技术开发仍然非常受人关注。对未来的技术发展, 许多专家都表达了自己的见解。归纳起来, 要解决的重要问题是: (1)、减薄碲化镉层的厚度, 力争小于 2 微米; (2)、降低沉积温度; (3)、寻求新的背接触层; (4)、提高小面积电池的转换效率。(5)、发展年产 GW 级的生产技术。

致力于碲化镉薄膜太阳能电池规模化生产的企业不是很多, 现在仍然在生产碲化镉薄膜太阳能电池组件的其实只有两家。美国的 First Solar Inc. 是全球最大的碲化镉薄膜太阳能电池制造商, 技术路线的核心是采用蒸汽输运法沉积碲化镉薄膜。该公司的前身 Solar Cell Inc. 第一次报道这项技术是在 1995 年。此生产线制造 1.2 × 0.6 m<sup>2</sup> 的组件, 平均转换效率为 7.5%, 光照面积的最高效率为 10.62%。技术的成功使碲化镉太阳能电池的成本从 2005 年的 1.59 美元/峰瓦降为目前的 1.19 美元/峰瓦, 是目前所有太阳能电池中最低的, 因此其销售价也是最低的。由此带来了市场和产业化的高速发展, 以及股价的迅速攀升。它在美国建有 90 兆瓦的生产线, 在德国建有 120

兆瓦生产线；正在马来西亚和新加坡建 240 兆瓦和 120 兆瓦的生产线。此外，自 2007 年来，美国又新建了 7 家公司计划生产碲化镉薄膜太阳能电池。

德国的 ANTEC 公司在 2000 年建成 8 MW 的自动化生产线，采用近空间升华技术生产  $1.2 \times 0.6 \text{ m}^2$  的碲化镉电池组件，平均效率在 6%—7% 之间，光照面积的最高效率为 7.92%。

几个厂家制造的大面积碲化镉薄膜太阳能电池组件的最高效率见表 2。作为对比，也列出了 Shell Solar 公司所研制的铜铟硒薄膜太阳能电池组件的结果。表中的\*号表示此结果由美国 NREL 所测。

表 2 各生产线研制的大面积碲化镉薄膜太阳能电池组件的最高效率

研制单位	材料	面积, cm <sup>2</sup>	效率, %	功率, W	日期, 月/年
BP Solar	CdTe	8390	11.0*	92.5*	09/2001
First Solar	CdTe	6623	10.2*	67.5*	02/2004
Mitsushita Battery	CdTe	5413	11.0	59.0	05/2000
ANTEC Solar	CdTe	6633	7.0	46.7	11/2001
Shell Solar	CIGS	3626	12.8*	46.5*	03/2003

值得注意的是，日本 Mitsushita 公司，美国 Golden Photon 和 BP Solar 公司研制的组件都达到了较高的效率，见表 2。Golden Photon 公司采用喷涂热分解技术，BP Solar 采用电沉积技术。但是，由于公司自身的原因，也由于技术路线上的原因，这几家公司先后关闭了他们的生产线。也就是说，采用非真空沉积技术的生产线都已被放弃。

#### 4. 国内研究与产业化状况

我国在“九五”期间开始了碲化镉薄膜太阳能电池的研究。北京太阳能研究所、云南师范大学、内蒙古大学、重庆大学、北方交通大学等单位也相继开展了碲化镉薄膜太阳能电池及相关材料的研究。有不少的论文发表。由于国外的研究和产业化工作取得了引人注目的进展，科技部在“九五”科技攻关计划中设置了子课题，开始了对碲化镉薄膜太阳能电池的资助。四川大学在这个资助下，制出了面积为  $0.5\text{cm}^2$ 、转换效率达 11.6% 的碲化镉薄膜太阳能电池。其主要的技术特点是采用了碲化锌/掺铜碲化锌作复合背接触层。



碲化镉薄膜太阳能电池中试生产线

“十五”期间，国家对化合物半导体薄膜太阳能电池的研究开发给予了前所未有的资助。“碲化镉薄膜太阳能电池的制造技术及中试生产线”课题由四川大学太阳能材料与器件研究所承担。在总体上，我们力图采用有利于产业化的材料和技术。例如，用普通商业透明导电膜钠钙浮法玻璃作衬底，前表面不使用减反射膜，不采用昂贵的氦气等。2003 年， $0.5\text{cm}^2$  的碲化镉薄膜太阳能电池，转换效率达 13.38%，已接近世界领先水平。

2006 年 9 月，年产 300 千瓦的中试生产线已经建成，所制造的组件面积为  $40\text{cm} \times 30\text{cm}$ 。此生产线直接用于组件制造的设备共 18 台，内中有 9 台关键设备的总体设计为课题组做出。这是我国第一条化合物半导体薄膜太阳能电池生产线，是一条具有自主知识产权、完全由国产设备构成的生产线。在这条中试生产线上研制的大

面积组件(组件衬底面积为  $30\text{cm} \times 40\text{cm}$ , 窗口面积为  $993.6\text{cm}^2$ 。经中国科学院太阳光伏发电系统和风力发电系统质量检测中心测试, 转换效率为  $8.25\%$ 。作为一个比较, 表 3 给出了四川大学、First Solar Inc.和 ANTEC 的组件最高效率。

表 3 世界领先的碲化镉薄膜太阳能电池组件的性能参数和我们组件的比较。开路电压和短路电流密度是约化为单位面积电池的数值。

单位		组件面积	开路电压	填充因子	短路电流密度	效率, %
First Solar	新结构	$0.72\text{ m}^2$	814 mV	64.00 %	$21.90\text{ mA/cm}^2$	11.41
	常规结构	$0.72\text{ m}^2$	806 mV	59.60 %	$22.10\text{ mA/cm}^2$	10.62
ANTEC		$0.72\text{ m}^2$	735 mV	53.90 %	$20.00\text{ mA/cm}^2$	7.92
四川大学		$0.12\text{ m}^2$	821 mV	57.93 %	$17.36\text{ mA/cm}^2$	8.25

## 致 谢

作者对科技部 863 计划能源技术领域后续能源技术主题的资助表示诚挚的感谢。合同号为 2001AA513010 及 2003AA513010。

## 参考文献

- [1] A.Tiwari, E-MRS, Symposium O, Nice, France, May 29-June 2, 2006.
- [2] 赵富鑫、魏彦章, “太阳能电池及其应用”, 国防工业出版社, 1985。
- [3] J.E.Trancik, K.Zweibel, “Technology Choice and The Cost Reduction Potential of Photovoltaic”, WCPEC 4, 2006.
- [4] V.M.Fthenakis and H.C.Kim, “CdTe Photovoltaic: Life Cycle Environmental Profile Comparisons”, E-MRS, Symposium O, Nice, France, May 29-June 2, 2006.

# 碲化镉薄膜太阳能电池技术和产业化进展

作者: [冯良桓](#), [蔡亚平](#), [张静全](#), [武莉莉](#), [黎兵](#), [李卫](#), [雷智](#), [蔡伟](#), [郑家贵](#)

作者单位: [四川大学材料科学系](#), 四川省 [成都市](#) 610064

## 本文读者也读过(8条)

1. [张静全](#), [冯良桓](#), [李卫](#), [蔡亚平](#), [蔡伟](#), [武莉莉](#), [雷智](#), [黎兵](#), [郑家贵](#) [发展碲化镉薄膜太阳能电池的几个关键问题](#)[会议论文]-2006
2. [美国First Solar公司碲化镉薄膜太阳能电池](#)[期刊论文]-[电源技术](#)2010, 34(3)
3. [冯良桓](#), [蔡伟](#), [黎兵](#), [蔡亚平](#), [李卫](#), [武莉莉](#), [张静全](#), [雷智](#), [郑家贵](#) [碲化镉薄膜太阳能电池组件的制造技术](#)[期刊论文]-[中国科技成果](#)2007(8)
4. [杨敏](#) [碲化镉太阳能电池的器件物理研究](#)[学位论文]2007
5. [苏菁](#), [郑家贵](#), [黎兵](#), [张静全](#), [冯良桓](#), [杨敏](#), [蔡亚平](#), [武莉莉](#), [李卫](#), [雷智](#), [蔡伟](#) [集成碲化镉薄膜太阳能电池的结构设计](#)[会议论文]-2006
6. [张静全](#), [冯良桓](#), [蔡亚平](#), [雷智](#), [武莉莉](#), [李卫](#), [黎兵](#), [蔡伟](#), [郑家贵](#) [1.5MeV电子辐照对碲化镉薄膜太阳能电池器件特性的影响](#)[会议论文]-2008
7. [侯荣华](#), [王燕](#), [陈望舒](#), [Hou RongHua](#), [Wang Yan](#), [Chen WangShu](#) [碲化镉\(CdTe\)薄膜太阳能电池实验室设备](#)[期刊论文]-[电子元器件资讯](#)2010(3)
8. [张榕](#), [周海平](#), [陈红](#), [ZHANG Rong](#), [ZHOU Haiping](#), [CHEN Hong](#) [碲化镉薄膜太阳能电池及其溅射制备](#)[期刊论文]-[材料导报](#)2006, 20(11)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference\\_6880272.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_6880272.aspx)