

# 光伏太阳能简介

文/李哲

在经济社会高速发展的今天，人类对能源的需求不断增长。回顾人类的能源利用历史，传统化石能源（煤、石油、天然气等）的大量使用给生态环境带来了破坏性的影响，造成了温室效应等一系列的问题，与此同时传统能源日益走向枯竭，因此可再生能源（水电、风能、太阳能等）成为了人类可持续发展的必然选择。

然而，可再生能源自身也存在一些问题：有些出于环境和安全方面的考虑，近年来发展速度减缓，如水电、核能；有些由于资源分布的局域性发展受到限制，如地热能、风能。因此，以光伏太阳能为代表的太阳能资源将成为未来可再生能源发展的重要组成部分。近年来，光伏太阳能发展迅速，并将保持高速增长；光伏发电的成本有望在几年内降到常规能源的水平，届时光伏太阳能将走进千家万户。

在进一步了解光伏太阳能之前，先对太阳能发电的基本原理作一个简单的介绍。

1839年，法国科学家贝克勒尔(A. E. Becquerel)发现一种奇特现象，某些材料被光照射时会产生电流，这种现象后来被称为“光生伏打效应”，即“光伏效应”。这就是太阳电池工作的基本原理。

太阳电池是由半导体材料制备的。这种材料在低温下是绝缘体，但是如果有外加的能量或热量时就成为导体。目前，由于硅材料的技术最为成熟，大多数太阳电池是用硅材料制造的。与此同时人们也在积极地研究其他可以取代硅的材料。

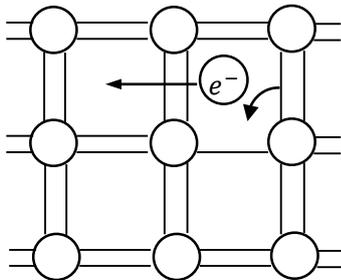


图1 硅晶格内的共价键的示意图

半导体材料的电学特性通常可以采用两种模型来解释，分别是化学键模型和能带模型。

化学键模型是运用将硅原子相结合的共价键来描述硅半导体的特性。图1显示了电子在硅材料晶格中的成键和移动。在低温下，这些共价键是完好的，硅材料显示出绝缘体的特征。但遇到高温的情况时，一些共价键就被破坏。此时有两种情况可以使硅材料导电：

1. 电子从被破坏掉的共价键中释放出来自由运动

2. 电子从相邻的共价键中移动到由被破坏的共价键所产生的“空穴”里，而那个相邻的共价键便遭到破坏。如此就能使得被破坏的共价键或称空穴得以传播，如同这些空穴具有正电荷一般。

空穴的运动的概念类似于液体中气泡的运动。

能带模型根据价带和导带间的能级来描述半导体的运作特性，如图2所示。

电子在共价键中的能量对应于其在价带的能量。电子在导带中是自由运动的。带隙的能量差反映了使电子脱离价带跃迁到导带所需的最小能量。只有电子进入导带才能

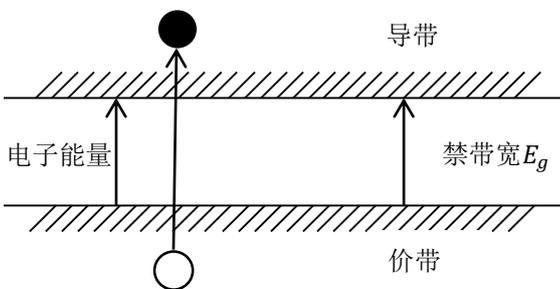


图2 电子在半导体能带中的示意图

产生电流。同时空穴在价带以相反于电子的方向运动，产生电流。这个模型被称作能带模型。

制备太阳电池的关键是P-N结。可以通过掺杂其它杂质原子来改变电子与空穴在硅晶格中的数量平衡，分别制备N型半导体和P型半导体（如图3）。掺入比原半导体材料多一个价电子的原子，可以制备N型半导体材料。掺入比原半导体材料少一个价电子的原子，可以制备P型半导体材料。

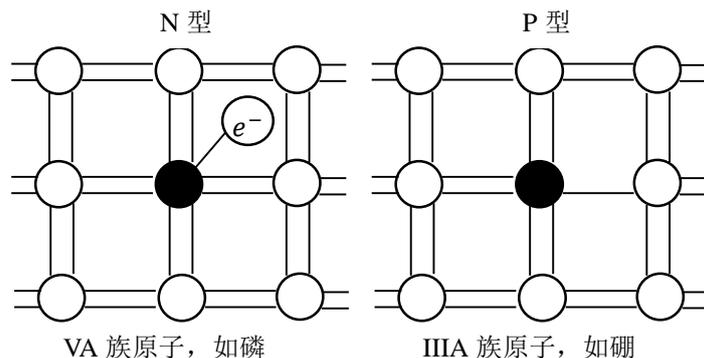


图3 通过在硅晶格中掺入不同杂质所产生的N型和P型半导体材料示意图

P-N结是由P型半导体和N型半导体连接而成，如图4所示。

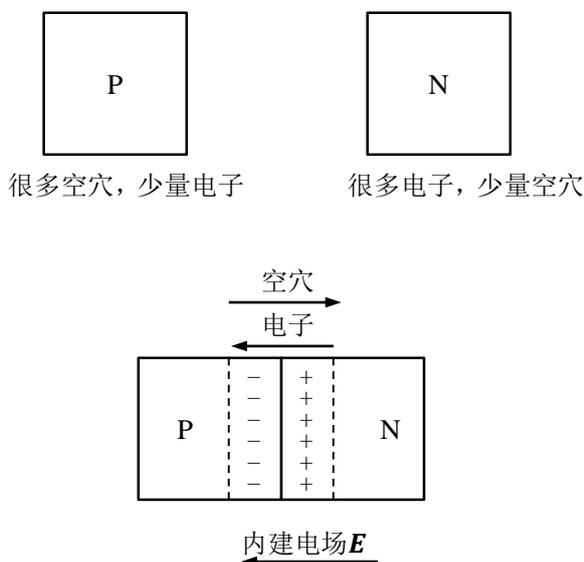


图4 P-N结的形成

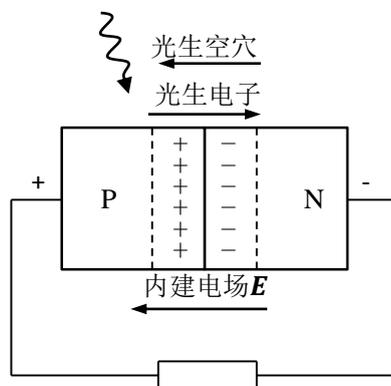


图5 光生电动势的形成

当连接在一起时，由于在 P-N 中不同区域的载流子分布存在浓度梯度，P 型半导体材料（记作 P 型区）中过剩的空穴通过扩散作用流动至 N 型半导体材料。同理，N 型半导体材料（记作 N 型区）中过剩的电子通过扩散作用流动至 P 型半导体材料。电子或空穴离开杂质原子后，该固定在晶格内的杂质原子被电离，因此在结区周围建立起了一个电场  $E$ ，以阻止电子和空穴的上述扩散流动。这样就会形成一个与材料相关特性有关的内建电压  $V_{bi}$ 。如果在 P-N 结上施加一个相反的电压，电场  $E$  会被减弱。一旦电场  $E$  不够大而无法阻止电子和空穴的流动，就会产生电流。而当 P-N 结受到太阳光照射时，材料吸收能量大于禁带宽度能量的光子，使电子发生跃迁，激发出光生电子-空穴对。在 P-N 结内建电场的驱动下，光生电子向 N 型区移动，使 N 型区带负电；同时，光生空穴向 P 型区移动，使 P 型区带正电，如图 5 所示。这样，在 P-N 结两端就产生了光生电动势，电场  $E$  被减弱，如

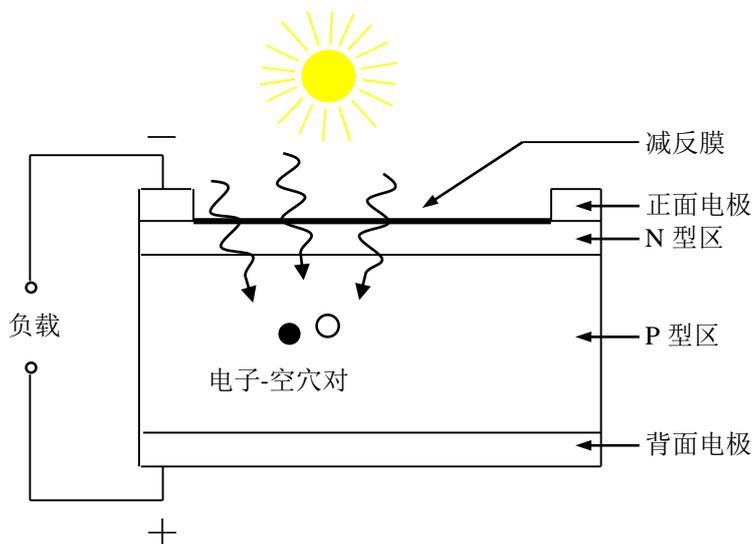


图6 太阳电池的一个简单模型

电子-空穴对。在 P-N 结内建电场的驱动下，光生电子向 N 型区移动，使 N 型区带负电；同时，光生空穴向 P 型区移动，使 P 型区带正电，如图 5 所示。这样，在 P-N 结两端就产生了光生电动势，电场  $E$  被减弱，如

果将 P 型区和 N 型区用导线连通，中间接上负载，那么负载上就有电流通过，产生功率，这就实现了光能向电能的转换。

图 6 显示的是太阳电池的一个简单模型，当然，实际应用中的太阳电池要比它复杂得多。

从刚才的原理中可以看出，太阳电池的一个关键是使用的材料。目前太阳电池主要可以分为两大类：一类是发展时间最长、技术上最成熟的硅基太阳电池，包括单晶硅太阳电池、多晶硅太阳电池和非晶硅太阳电池。由于纯硅不易制得且价格较高，人们开始尝试减少硅的使用量或使用其他材料来制备太阳电池，发展出了第二类太阳电池即薄膜电池，包括 a-Si:H 薄膜电池、c-Si 薄膜电池、CIS 薄膜电池（或 CIGS 薄膜电池）、CdTe 薄膜电池、染料敏化电池和有机太阳电池等。薄膜电池目前还有许多物理问题需要解决，如效率不高、稳定性不够好等等。以有机太阳电池为例，它目前的效率只有大约 10%，与单晶硅太阳电池的效率相比还有较大的差距；而有机材料正常工作对温度的依赖较高，这也限制了它的应用范围。

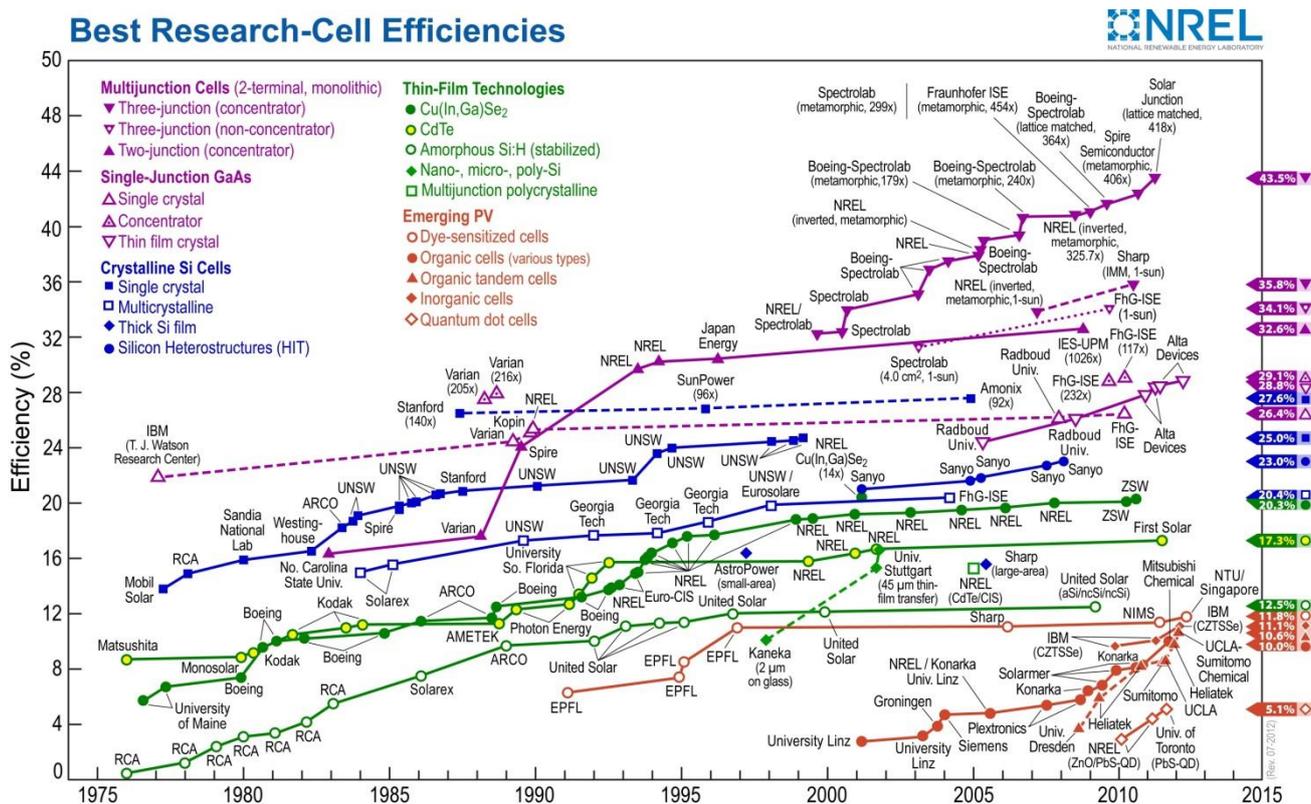


图 7

光伏太阳能作为一种新兴的能源形式，系统的效率自然很受到人们的关注。历史上，1883 年由 Charles Fritts 制备的第一个太阳电池的效率只有 1%，1954 年由贝尔实验室制备的第一个有实际应用价值的太阳电池的效率为 6%。经过几十年的发展，目前实验室里单晶硅电池的效率已经达到了 25%，商业化组件可以达到 20%。截至 2012 年 7 月实验室可以实现的最高太阳电池效率的记录可见图 7。

在理论上有一个 Shockley-Queisser 极限，这个极限指出，单 P-N 结硅太阳电池最高可以达到的效率为 33.7%。目前单晶硅太阳电池的效率已经接近这个值，进一步提高效率变得更加困难，且需要更大的资金投入。人们开始尝试使用其他方法来提高电池的效率，如使用多结光伏电池（也称为 Tandem cells）、使用聚光源、捕捉热电子等。使用多结光伏电池是目前研究最多的一种方法，它在非聚光条件下理论最高效率可以达到 68%。实验室目前最好的结果为 44%，但还无法应用于商业用途。

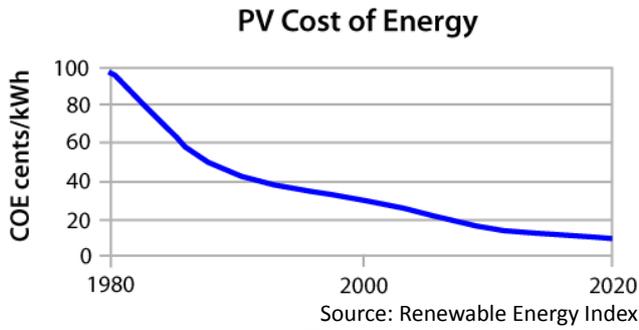


图 8

在效率提高的同时，光伏太阳能的成本在不断降低。图 8 显示了每千瓦时光伏太阳能的价格的变化。有人预计，按照这样的发展趋势，在 2015 年光伏太阳能的成本就可以与常规能源相当，也就是说，那时光伏太阳能就可以取代目前主要依赖火力发电的能源结构，煤炭将成为历史。

从全球范围内来看，近年来，世界光伏市场持续高速发展，尤其是从 2007 年开始，整个市场呈现出爆炸式增长的趋势，如图 9 所示。近 5 年光伏装机量年均增长率超过 50%，至 2011 年底全球累积装机量已达 69.7GW。随着美国、中国、韩国等市场的兴起，预计 2012 年及以后仍将保持高速增长势头。目前，欧美发达国家和日本为光伏的主要市场。1991 年，德国首先提出了“1000 光伏屋顶”计划，开创了政府支持太阳能产业发展的先河。由于多年来政策的大力支持，现在德国已经成为世界最大的光伏市场，至 2011 年底累积装机量为 24.7GW，占全球市场份额的 36%，如图 10 所示。

Evolution of global cumulative installed capacity 2000-2011 (MW)

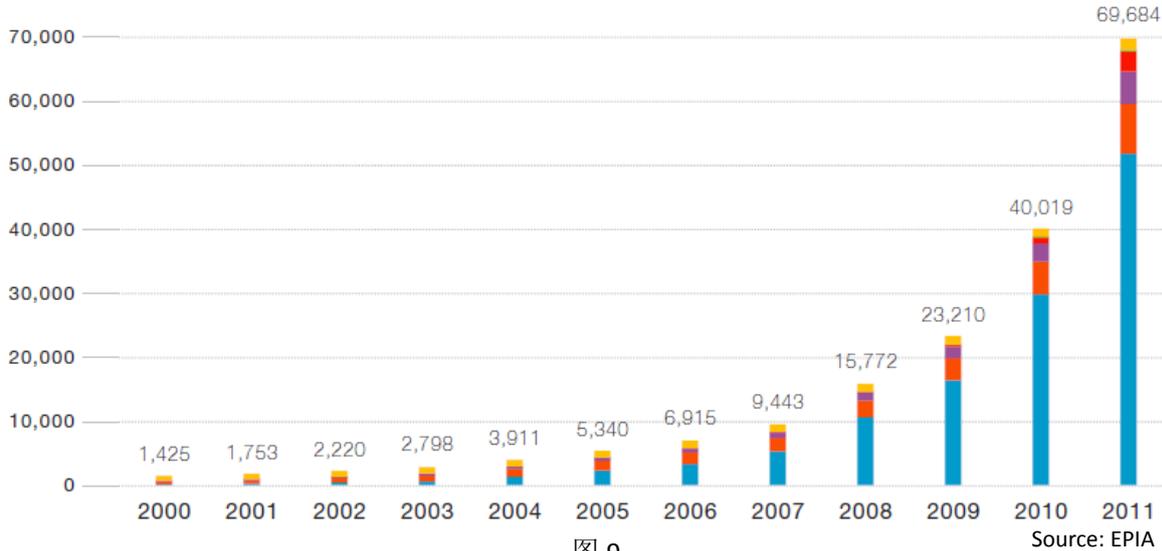


图 9

Global cumulative installed capacity share 2011 (MW; %)

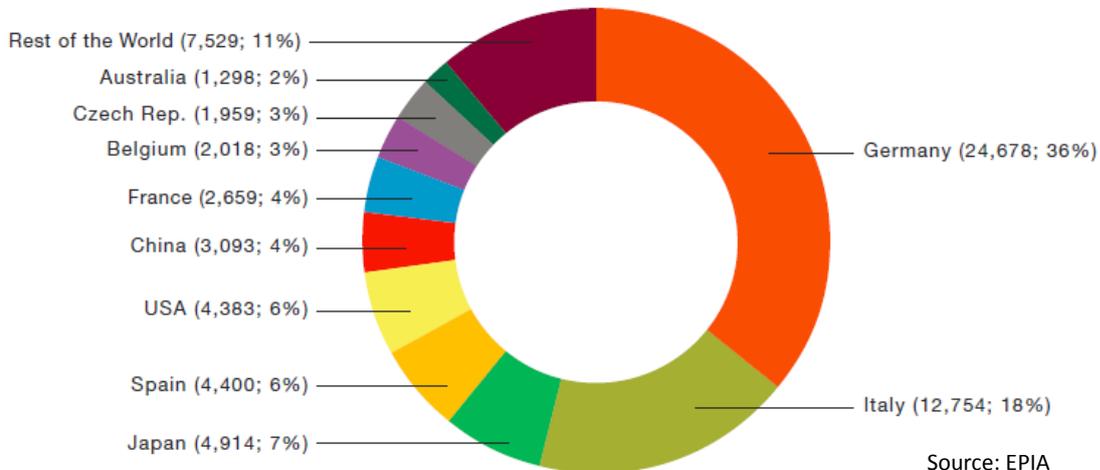


图 10

与此同时，我国光伏制造业发展迅速，产业规模迅速扩大，产品广销国际市场，自 2002 年以来，连

续多年以 100% 以上的年增长率快速发展，2007-2010 年连续四年太阳电池产量世界第一。2010 年我国新增装机量 520MW，首次跻身世界前十，而从总体上来看，目前我国装机容量为 3.1GW，仅占世界市场份额的 4%。技术上，太阳电池领域我国在除晶体硅电池以外的其他太阳电池技术方面仍处于落后地位；在光伏生产设备方面整体技术水平同国际一流厂商相比仍有较大差距，成套生产线自动化程度低。我国的光伏产业仍有很大的发展空间。

光伏太阳能具有很多其他能源无法比拟的优势，如无污染、资源庞大、实用性强等，但是目前还有一系列技术上的问题有待突破，其中首要的问题就是要尽快提高太阳电池的效率 and 降低成本。此外，在光伏发电微网系统等方面还有待深入研究。光伏太阳能从进入实用化到大规模普及利用，其间仍需要 20-30 年的时间。

经过世界各国多年的努力，光伏产业已步入实用化的范畴。光伏太阳能正快速走进人类的生活，并将很快成为人类发展的重要能源，光伏太阳能大有可为。

参考资料：

- [1] S.R. Wenham, M.A. Green, M.E. Watt and R. Corkish, *Applied Photovoltaics*, Earthscan, 2nd Edition, Cornwall (2007)
- [2] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学. 第 7 版, 北京: 电子工业出版社, 2011
- [3] 许洪华. 太阳能光伏发展形势报告. 2012 年 3 月
- [4] European Photovoltaic Industry Association, *Global Market Outlook for Photovoltaics until 2016* (2012)
- [5] 张凤鸣, 吴小山. 报告: 光伏太阳能——现状与发展. 南京大学. 2012 年 7 月 16 日
- [6] 维基百科, 太阳电池 (<http://zh.wikipedia.org/wiki/太阳电池>)
- [7] Wikipedia, *Shockley-Queisser limit* ([http://en.wikipedia.org/wiki/Shockley-Queisser\\_limit](http://en.wikipedia.org/wiki/Shockley-Queisser_limit))
- [8] National Renewable Energy Laboratory, *Best Research-Cell Efficiencies* ([http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVeфф\(rev120717\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVeфф(rev120717).jpg)) (2012)