

光伏发电原理

1.1 光伏发电的过去、现在及未来

1839 年, 法国人 Edmund Bequerel 发现了光伏效应, 到了 1954 年, 贝尔实验室的 Chapin, Fuller and Pearson 制备了世界上第一个效率为 6% 的晶体硅太阳电池。从此, 航天技术和地面特殊领域的需求驱使对光伏有兴趣的学者进行着艰苦的探索, 效率很快由当初的 6% 提高到 10%, 并于 1958 年首先在航天器上得到应用。在后来的 10 多年里, 硅太阳电池在空间的应用不断扩大, 工艺不断改进, 电池设计不断改型, 新的光伏材料也在不断探索之中, 这是硅太阳电池发展的第一个时期。第二个时期开始于 70 年代初, 在这个时期对太阳电池材料、结构和工艺进行了广泛的研究, 背表面电场、细栅金属化、浅结表面扩散和表面织构化开始引入到电池的制造工艺中, 太阳电池转换效率有了较大提高。与此同时, 硅太阳电池开始在地面应用, 到了 70 年代末, 地面用太阳电池产量已超过空间电池产量, 但单晶硅太阳电池高昂的成本促使科学家们把目光瞄准了其它光伏电池。其间最具影响的是 1976 年制成了 AM1 效率达 10% 的多晶硅太阳电池。同年, RCA's David Sarnoff Research Center 的光伏专家 D. E. Carlson 制成了世界上第一个光电转换效率为 2.4% 的可供实用的非晶硅太阳电池, 在这个消息的鼓舞下, 迅速掀起了非晶硅太阳电池的研究热潮, 并且取得了很大的成绩, 另外 CIS/CdS、CdTe/CdS 等光伏电池的研究也取得了可喜的成就。进入 80 年代, 硅太阳电池进入快速发展的第三个时期。这个时期的主要特征是把表面钝化技术、降低接触复合效应、后处理提高载流子寿命、改进陷光效应引入到电池的制造工艺中。以各种高效电池为代表, 电池效率大幅度提高, 商业化生产成本进一步降低, 应用不断扩大, 形成了非晶硅、多晶硅和单晶硅三足鼎立之势。但基础领域的一些问题愈来愈制约着迅猛发展的实践, 多线切割技术的发展使人们获得更薄的晶体硅片成为可能, 原来的晶体硅太阳电池技术必须做出相应的改变。采用薄的晶体硅片, 载流子的表面复合问题就突现了出来; 碎片率的上升促使人们得重新设计电极的制备工艺。只有这样, 才能保证得到更高的性能价格比。太阳级单晶硅电池的衰减也逐渐显示出来, 多晶硅中的晶界效应限制了多晶硅光伏电池效率的进一步提高, 多晶硅光伏电池并没有显示出优于单晶硅电池的成本, 非晶硅光伏电池中的 S—W 效应及有限的市场使得首先将这一高新技术产业化的公司面临倒闭的危机。进入 90 年代后, 光伏专家们加紧了对缺陷晶体硅中载流子行为的研究, 并将高效工艺产业化, 努力将这一最具发展前景的太阳电池稳步推向前进^[1-3]。

光伏电池是光伏发电系统的核心, 其光电转换效率和成本对光伏发电的进程具有决定性的影响。自 1941 年出现了有关硅光伏电池的报道之后, 科学家们就没有停止过

对进一步提高效率和廉价新材料的研究，半个世纪以来，人们为太阳电池的研究、发展和产业化付出了很大的努力。光伏技术中新技术、新工艺、新材料和新结构层出不穷，研制成功许多种太阳电池。在太阳电池的整个发展历程中，先后出现过各种不同结构的电池，从结构上看，有同质n-p结、肖特基（MS）电池、MIS电池、MINP电池、异质结电池、垂直多结等类型。其中同质结中的钝化发射区电池（PERL），钝化发射区背面整个扩散电池（PERT），刻槽埋栅电池（BCSC），背面点接触电池（PCC），深结局部背场电池（LBSF）等是高效电池的代表。目前世界上太阳电池的实验室效率最高水平：单晶硅电池24.7%（4cm²），多晶硅电池19.8%（4cm²），InGaP/GaAs双结电池30.28%（AM1），非晶硅电池14.5%（初始），12.8%（稳定），CdTe/CdS电池为15.8%，带硅电池14.6%，二氧化钛有机纳米电池10.96%^[4]。

经过光伏专家们的辛勤劳动，晶体硅（包括单晶硅和多晶硅）太阳电池的工业化生产效率已从上世纪80年代的10-12%提高到目前的15-17%，单片面积也从当时的78.5cm²增加到243.36cm²，硅片的厚度也从当时的450μm降低到当前的180μm，这极大地降低了光伏发电的成本，更为重要的是人们对太阳能成为未来替代能源树立了信心，一些国家和政府相继制定了光伏发电上网的补贴政策，以加快光伏发电的商业化进程^[5]。

目前，光伏市场上销售的太阳电池主要是基于片状硅的第一代太阳电池，包括单晶硅太阳电池和多晶硅太阳电池；基于非晶硅及多晶化合物半导体的第二代太阳电池约占市场份额不足整个光伏市场的10%，包括非晶硅、CIS、CdTe、纳米氧化钛染料电池及多晶硅薄膜太阳电池。在第二代太阳电池中，a-Si:H太阳电池存在衰减，CIS太阳电池在制造上存在难题，CdTe太阳电池对环境有害，纳米氧化钛染料电池的发展还不明朗，因此人们普遍认为第一代太阳电池将会在很长的一段时间里是太阳能光伏发电的主力。

历史进入二十一世纪，环境污染和能源短缺迫人们寻找可持续发展且清洁的能源发展方向，最有效的行动就是采用清洁的可再生能源技术替代常规化石燃料能源技术。从上世纪70年代地面应用开始，美国就先后制定了一系列鼓励光伏发电应用政策；1974年日本开始执行阳光计划，颁布了相应的鼓励政策。此后许多国家，先后颁布了几十种鼓励光伏发电应用的政策，包括减免税、补贴、贴息、租赁、电力配额等政策。但截至2004年以前，各种政策所发挥的作用都相当有限。如上世纪90年代初，克林顿政府提出百万屋顶计划及相应鼓励政策就收效不大，但直到德国的可再生能源法出现，人们才真正找到了科学的、行之有效的措施。上世纪90年代中后期德国对世界几种较成熟的光伏技术进行认真研究和分析。依据光伏组件30年来的成本变化规律以及规模效应，得出光伏组件成本随累计安装量呈指数下降趋势（Learning Curve），安装量每扩大一倍，成本下降20%。分析结果表明，只要通过开拓市场，扩大组件生产，晶硅电池、CdTe电池和CIGS电池等都可以使组件成本下降到1美元/W左右。上述的研究结果成为上网电价法的理论依据。

德国在实施十万屋顶计划(1999—20003)基础上,对光伏上网电价进行修订,2004年1月1日实施。修正后的上网电价更加科学、更加合理,更加容易操作。上网电价法还规定,以后每年上网电价下降5%,既符合实际,又符合上网电价法实施的目的。自2004年起,德国一跃成为世界光伏市场和光伏产业发展最快的国家,并拉动了其他国家光伏产业的发展,表1-1给出了德国的上网电价,表1-2给出了德国2008年的PV上网电价。对比表1-1和表1-2可知:《可再生能源法》是加速可再生能源发展、实现及时替代化石燃料能源的唯一保证和必要条件。

《上网电价法》的科学性、有效性和可操作性,很快被世界许多国家认同、接受和效法,目前已经有40多个国家和地区实施了《上网电价法》,光伏市场从德国很快扩张到整个欧洲、美国、南韩国家,而且还正在向更大范围扩大^[6-8]。

毫无疑问,在各个国家可再生能源法的保障下,太阳能将会成为人类的支柱能源之一,人们预测:本实际中叶前能源结构将发生根本性变革,如图1-1所示。图1-2给出了欧洲JRC预测本世纪内常规能源及新能源发展趋势。

表1-1 德国2004年的PV上网电价

上网价格/ kWh	<30kWp	30-100kWp	>100kWp
建筑屋顶	57.4 欧分	54.6 欧分	54.0 欧分
建筑幕帘	62.4 欧分	59.6 欧分	59.0 欧分
地面系统	45.7欧分	45.7欧分	45.7欧分

表1-2 德国2008年的PV上网电价

上网价格/ kWh	<30kWp	30-100kWp	>100kWp
建筑屋顶	46.75 欧分	44.48 欧分	43.99 欧分
建筑幕帘	35.54欧分	35.54欧分	35.54欧分
地面系统	35.49欧分	35.49欧分	35.49欧分

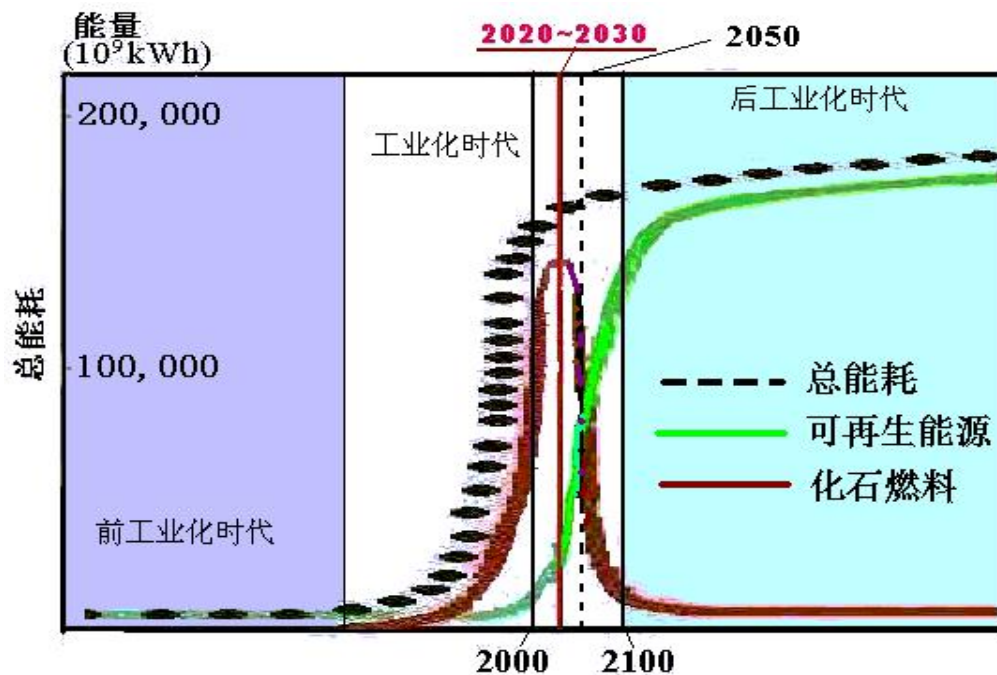


图1-1能源结构变化趋势

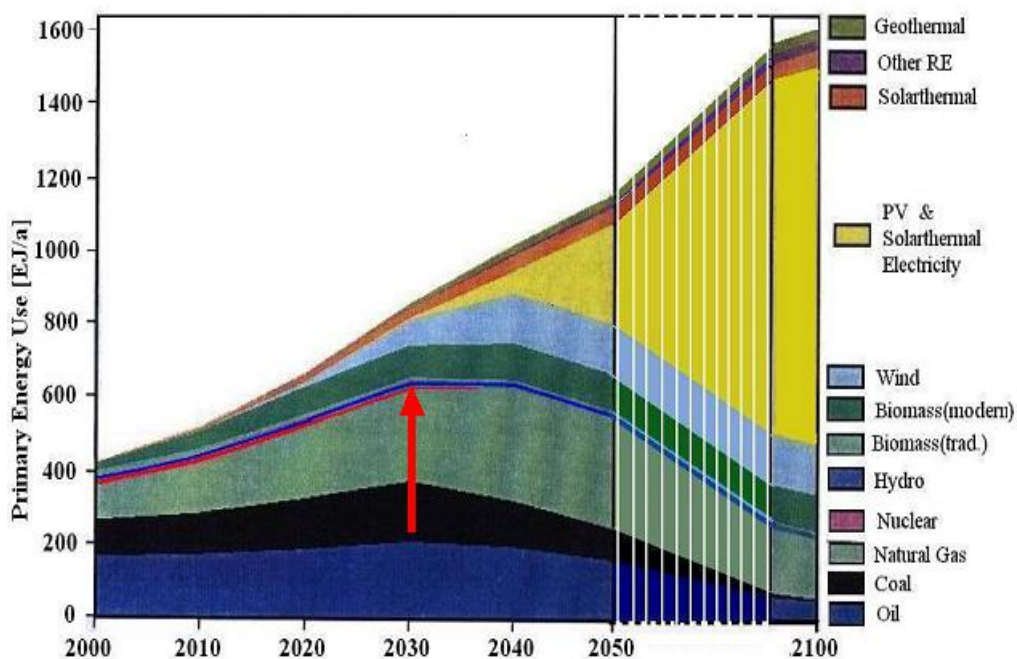


图1-2 2004年欧洲JRC预测本世纪内常规能源及新能源发展趋势

2007 年世界太阳能电池产量达 4410 MW，近 10 年太阳能电池的年平均增长率为 42.7%，近 5 年的年平均增长率为 51%，在原材料供应紧张的情况下，2006 和 2007 年太阳能电池的年增长率仍然分别达到 50% 和 67%。

从资源的潜力和长远前景来看，光伏发电是很具潜力的可再生替代能源。图 1-3 示出了 1999-2007 年全球太阳电池产量的增长情况。

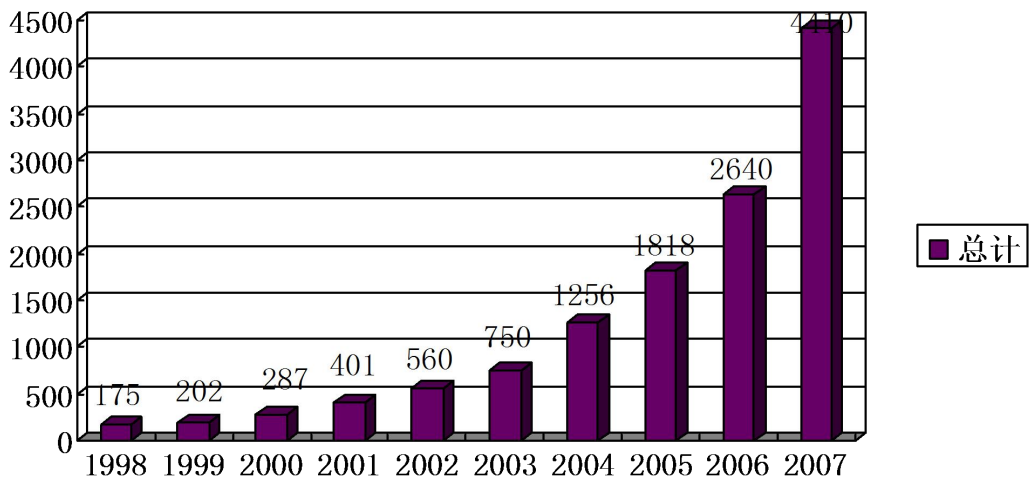


图 1-3 1998-2007 年全球太阳电池产量的增长情况

世界上一些发达国家纷纷宣布了自己的光伏发展计划，美国能源部国家光伏规划目标是到 2010 年光伏发电装机达到 4.7GW;日本计划到 2010 年光伏发电装机达到 5GW;欧洲提出到 2010 年光伏发电装机达到 3GW ;再加上其它国家近年一直保持占世界光伏组件总产量 10%左右的装机量, 预计到 2010 年, 世界光伏发电累计安装容量达到 15GW。

太阳能发电主要用于并网发电，在美国、日本、德国等国家，已有专业从事太阳能发电的公司，即这些公司租用土地建设并经营太阳能发电厂，他们通过将太阳能产生的电力销售给电力公司来获利（有可再生能源法保障）。一些个人也在自己的屋顶上利用太阳能发电，通过并网逆变器和大电网并网。图 1-4 示出了正在国外建设的家庭太阳能发电方案。

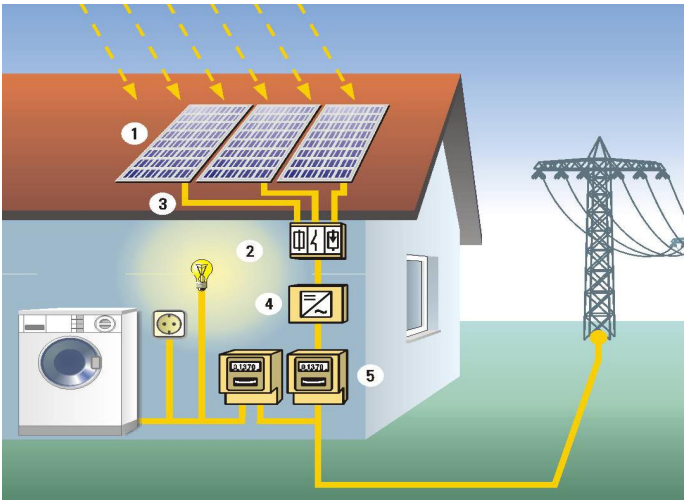


图 1-4 正在国外建设的家庭太阳能发电方案

我国的光伏产业自 2003 年以来，以超常的速度发展，年增长率达到 100%-300%。

2006 年我国太阳能电池产量 438MW_p，占世界总产量 2561.2MW_p 的 17.1%，超过美国 179.6MW_p），成为继日本（926.9MW_p）和欧洲（680.3MW_p）之后的第三大太阳能电池生产国，

2007 年我国太阳能电池产量 1088MW_p，超过日本（920MW_p）和欧洲（1062.8MW_p），成为世界第一大太阳能电池生产国。

在短短的四年间，我国光伏电池的产量，由 2002 年的仅占世界总产量的 1.07%，增长到 2007 年的占 27.2%，图 1-5 给出了世界各国近几年来太阳能电池的生产情况，从该表中可直观地看出我国近几年的发展情况^[9-12]。

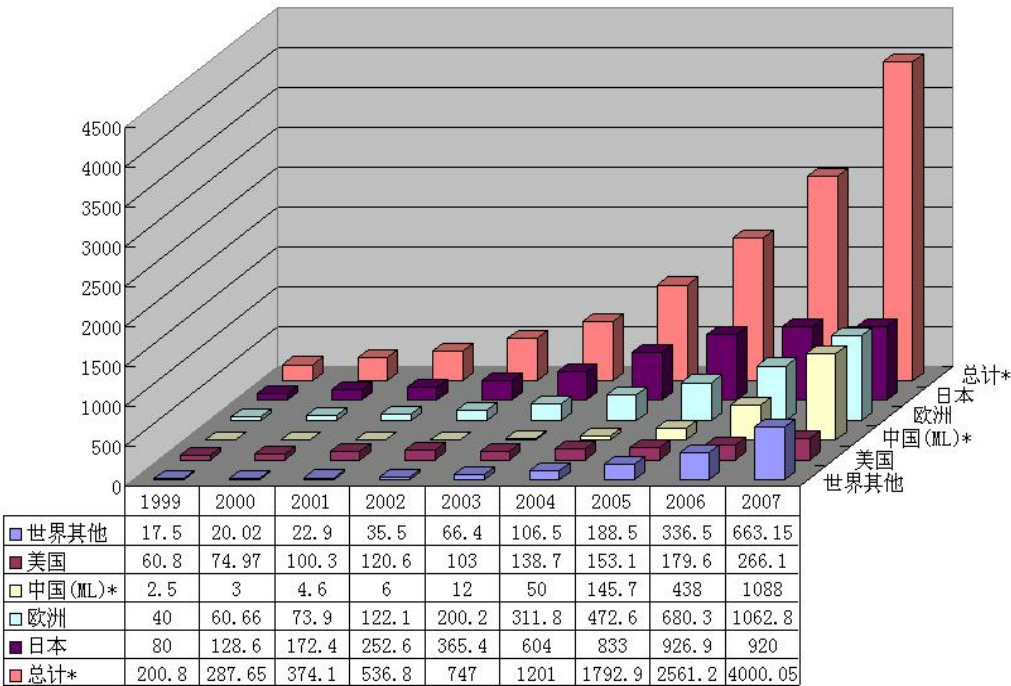


图 1-5 世界各国近几年来太阳能电池的生产情况

表 1-3 给出了 2007 年电池产量等于和大于 20MW_p 的生产商排名，共有 35 家公司表中有名，其中 14 家为中国公司（4 家台湾公司），占 35 家的 40% 。

表 1-3 2007 年电池产量等于和大于 20MW_p 的生产商排名

序 号	公司名称	2006 年		2007 年	
		产量， MWp	排 名	产量， MWp	排 名
1	Q-Cell (DE)	253.1	2	389.2	1
2	Sharp (JP)	434.4	1	363.0	2
3	Suntech (CH)	157.5	4	327	3
4	Kyocera (JP)	180	3	207	4
5	Firstsolar (US+DE)	60	13	207	4

6	Motech (TW)	102	7	196	5
7	Sanyo (JP)	155	5	165	6
8	SunPower (PH)	62.7	11	150.0	7
9	Baoding	35.0	17	142.5	8
	Yingli (CH)				
10	Solar	86.0	9	130.0	9
	world(whole)				
11	Misubishi (JP)	111	6	121	10
12	Jing-Ao (CH)	25.0	20	113.2	11
13	BP Solar(whole)	85.7	9	101.6	12
14	Solarfun (CH)	25.0	20	88.0	13
15	Isofoton (SP)	61	12	85	14
16	Schott Solar (DE+ US)	93.0	8	80.0	15
17	CEEG Nanjing (CH)	54.0	14	78.0	16
18	E-TON (TW)	32.5	17	72.0	17
19	ATS-Solar (CH)	25	20	55	18
20	Gintech (TW)	15.0	21	55.0	18
21	Ersolr (DE)	40	15	53	19
22	Ever-Q (DE)	15	21	49.8	20
23	United Solar (US)	28.0	19	48.0	21
24	Scancell (NW)	37.0	16	46.0	22
25	Ningbo Solar (CH)	30	18	45	23
26	Delsolar (TW)	20	20	45.0	23
27	Kaneka (JP)	28.0	19	40.0	24
28	Solland (NE)	18.0	21	37.0	25
29	Trina Solar (CH)	7.0		37.0	25
30	Sunways (DE)	30.0	18	36.0	26
31	Jiangsu	14		35	27
	Junxin (CH)				
32	Photovoltaic (BE)	18.0		29.1	28
33	Microsol	15.0		28.0	29
	Inter. (UAE)				
34	交大泰阳 (CH)	21		25	30
35	Photowatt	24		20	31

和产业相适应，欧美和日本等发达国家用于光伏研究的科研经费大幅增加，我国

的光伏研究也日渐活跃，国家自然科学基金及“973”项目都加大了对光伏发电的支持，研究队伍也随之加强，可以预料：在大量资金和人力的投入下，光伏产业和研究必将取得长足的进展。

1.2 晶体硅太阳能电池原理

如图2-1(a)所示，在一块半导体中n型和p型的接触处，n区一侧的电子浓度高，形成一个要向p区扩散的正电荷区域；同样，p区一侧的空穴浓度高，形成一个要向n区扩散的负电荷区域。n区和p区交界面两侧的正、负电荷薄层区域，称之为“空间电荷区”，即p-n结，如图2-1(b)所示。p-n结内有一个由p-n结内部电荷产生的，从n区指向p区的电场，叫做“内建电场”或“自建电场”。由于存在内建电场，在空间电荷区内将产生载流子的漂移运动，使电子由p区拉回n区，使空穴由n区拉回p区，其运动方向正好和扩散运动的方向相反。

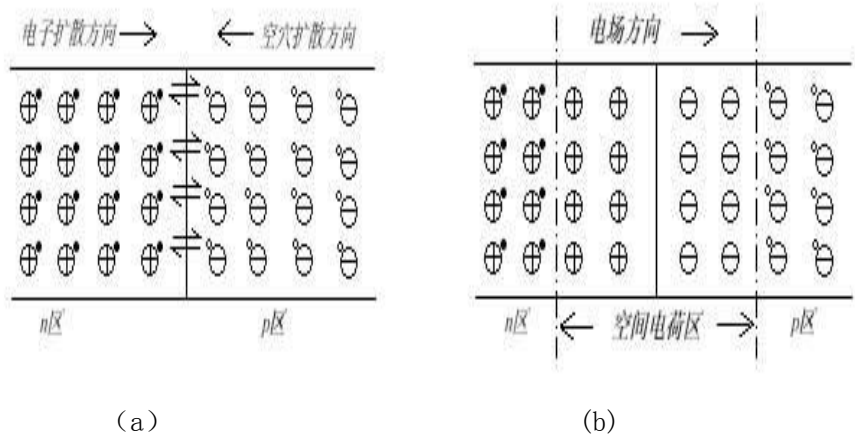


图2-1 (a) 形成P-N 结前载流子的扩散过程 (b) 空间电荷区和内建电场

开始时，扩散运动占优势，空间电荷区内两侧的正负电荷逐渐增加，空间电荷区增宽，内建电场增强；随着内建电场的增强，漂移运动也随之增强，阻止扩散运动的进行，使其逐步减弱；最后，扩散的载流子数目和漂移的载流子数目相等而运动方向相反，达到动态平衡。此时在内建电场两边，n区的电势高，p区的电势低，这个电势差称作p-n结势垒，也叫内建电势差或接触电势差，用符号 V_D 表示。电子从n区流向p区，p区相对于n区的电势差为负值。由于p区相对于n区的电势为 $-V_D$ （取n区电势为零），所以p区中所有电子都具有一个附加电势能： qV_D 通常将 qV_D 称作势垒高度。当p-n结加上正向偏压（即p区接电源的正极，n区接负极），此时外加电压的方向与内建电场的方向相反，使空间电荷区中的电场减弱。这样就打破了扩散运动和漂移运动的相对平衡，有电子源源不断地从n区扩散到p区，空穴从p区扩散到n区，使载流子的扩散运动超过漂移运动。由于n区电子和p区空穴均是多子，通过p-n结的电流（称为正向电流）很大。当p-n结加上反向偏压（即n区接电源的正极，p区接负极），此时外加电压的方向与内建电场的方向相同，增强了空间电荷区中的电场，载流子的漂移运动超过扩散运动。这时n区中的空穴一旦到达空间电荷区边界，就要被电场拉向p区；p区的电子一旦到达空间电荷区边界，也要被电场拉向n区。它们构成p-n结的反向电流，方向是由n

区流向p区。由于n区中的空穴和p区的电子均为少数，故通过p-n结的反向电流很快饱和，而且很小。电流容易从p区流向n区，不易从相反的方向通过p-n结，这就是p-n结的单向导电性。

当太阳电池受到光照时，光在n区、空间电荷区和p区被吸收，分别产生电子空穴对。由于从太阳电池表面到体内入射光强度成指数衰减，在各处产生光生载流子的数量有差别，沿光强衰减方向将形成光生载流子的浓度梯度，从而产生载流子的扩散运动。n区中产生的光生载流子到达p-n结区n侧边界时，由于内建电场的方向是从n区指向p区，静电力立即将光生空穴拉到p区，光生电子阻留在n区。同理，从p区产生的光生电子到达pn结区p侧边界时，立即被内建电场拉向n区，空穴被阻留在p区。同样，空间电荷区中产生的光生电子空穴对则自然被内建电场分别拉向n区和p区。p-n结及两边产生的光生载流子就被内建电场分离，在p区聚集光生空穴，在n区聚集光生电子，使p区带正电，n区带负电，在p-n结两边产生光生电动势。上述过程通常称作光生伏打效应或光伏效应。当太阳电池的两端接上负载，这些分离的电荷就形成电流，如图2-2。

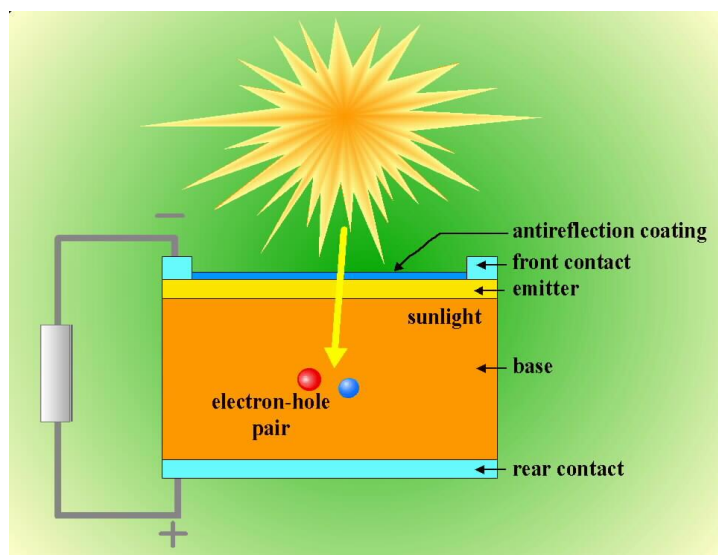


图2-2 太阳电池的发电原理图

1.3 晶体硅太阳电池的结构与性能参数

1.3.1 晶体硅太阳电池的结构

晶体硅太阳电池的结构如图 2-3 所示。先在硅片上制备适当的陷光结构，以减小入射光在硅片表面的反射，电池的迎光面有一层减反射膜，也起减小入射光在硅片表面反射的作用，可以说：绒面和光学减反射膜是相得益彰，前电极（银浆）及背电极（铝浆）是用丝网印刷的工艺形成的，背电极同时也形成了一个高低结，磷扩散既可用链式烧结炉也可用管式扩散炉^[15]。

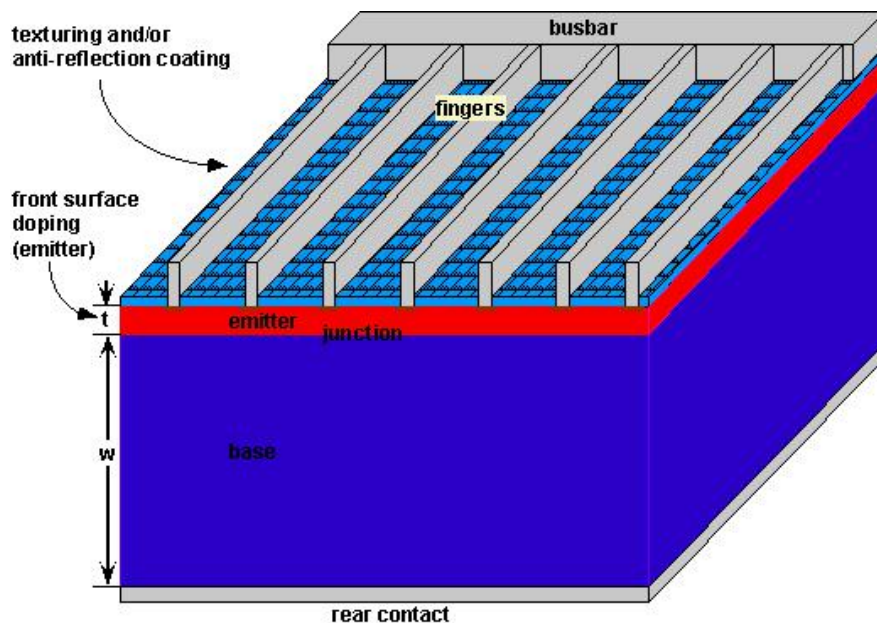


图 2-3 晶体硅太阳能电池的结构

1.3.2 晶体硅太阳能电池的性能参数

1) 太阳光谱及标准测试条件

太阳是以光辐射的方式将能量输送到地球表面上的，阳光穿过地球大气层时被吸收、散射或反射，因而太阳辐照度将被削弱。这种削弱还与太阳辐射穿透大气层的厚度、太阳辐射的方向等有关，通常用大气质量(AM)来表示上述情况。在地球大气层之外，地球-太阳平均距离处，垂直于太阳光方向的单位面积上的辐射能基本为一常数。这个辐射强度称为太阳常数，或称此辐射为大气质量为零（AM0）的辐射。目前，光伏工作中采用的太阳常数值是 $1.353\text{kW}/\text{m}^2$ ，这个数值是由装在气球，高空飞机和宇宙飞船上的仪器的测量值加权平均而确定的。阳光能量的精确分布对于太阳电池的工作很重要，因为这些电池对于不同波长的光有不同的反应。

太阳在头顶正上方时，路程最短，太阳光线的实际路程和此最短路程之比称为光学大气质量。太阳在头顶正上方时，光学大气质量为 1，这时的辐射称为大气质量为 1 (AM1) 辐射。当太阳和头顶正上方成一个角度 θ 时，大气质量由下式得出：大气质量 $= 1/\cos\theta$

AM 表示入射到地球上的大气的太阳直射光所通过的路程长度，定义为

$$AM = \frac{b}{b_0} \sec \theta = \frac{b}{b_0} \frac{Z}{Z_0} \quad (2-1)$$

式中：

b_0 ——标准大气压

b ——测定时的大气压

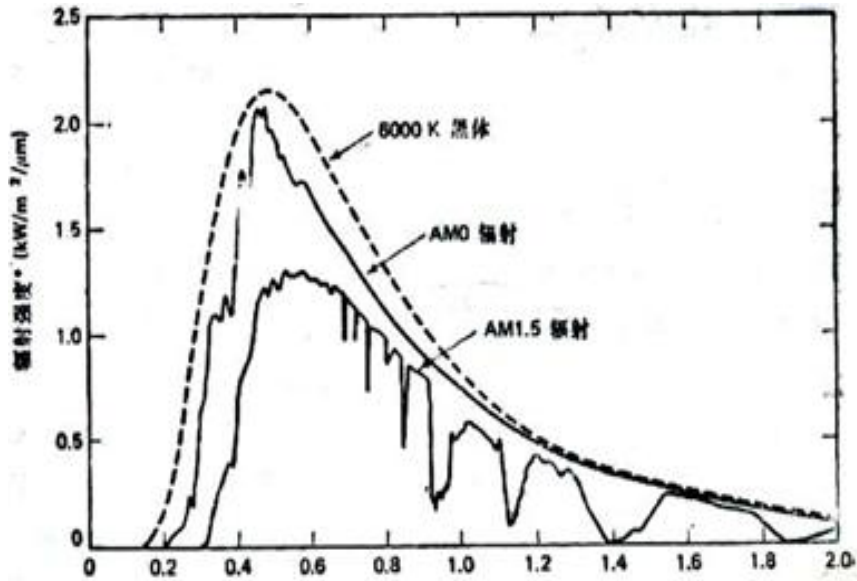
Z_0 ——太阳天顶距离

一般情况下， $b \approx b_0$ ，例如，AM1 相当于太阳在天顶位置时的情况，AM2 相当于太

阳高度角为 60° 时的情况，AM0 则表示在宇宙空间中的分布。

在其他大气变量不变的情况下，随着大气质量的增加，到达地球的能量在所有波段都遭到衰减。在阳光的光谱分布中，吸收带附近衰减更为严重。

与地球大气层外的情况相反，地面阳光的强度和光谱成分变化都很大。因此为了对不同地点测得的不同太阳电池的性能进行有意义的比较，就必须确定一个地面标准，然后参照这个标准进行测量。（一般采用 AM1.5 的分布，即总功率密度为 $1\text{KW}/\text{m}^2$ ($100\text{mW}/\text{cm}^2$)，即接近地球表面接收到的功率密度的最大值）。



太阳电池的光电转换效率和测试条件紧密相关，为了有一个统一的标准，人们规定标准测试条件（STC）为：AM1.5； $100\text{mW}/\text{cm}^2$ ； 25°C 。

2) 晶体硅太阳能电池的性能参数

用于描述晶体硅太阳能电池的性能参数有开路电压、短路电流、工作电压、工作电流、填充因子、光电转换效率。

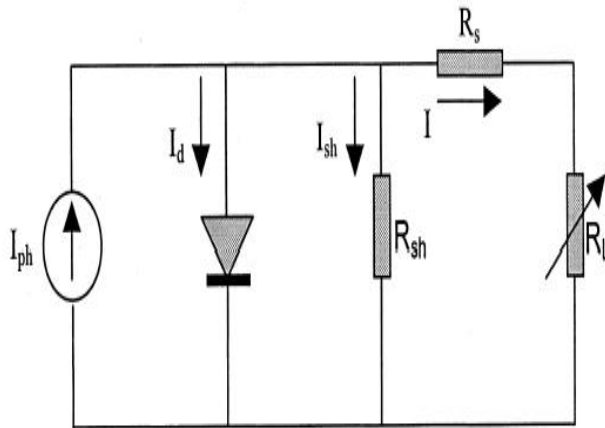


图 2-5 晶体硅太阳能电池的等效电路

晶体硅太阳电池的等效电路如图 2-5 所示，图中 R_s 为太阳电池等效串联电阻，包括：太阳电池的基区电阻、扩散区的薄层电阻，电极接触电阻等，在运行时和负载串联在同一回路内； R_{sh} 为太阳电池等效并联电阻，即在太阳电池内部产生的光生电流，有一部分通过电池的边缘漏电而损失，相当于一个泄漏电阻并联在电池的两极之间； R_L 为负载电阻； I_{ph} 为光生载流子在 p-n 结内电场作用下漂移运动产生的电流，称为光生电流； I_d 为流过太阳电池二极管的电流； I_{sh} 为流过并联电阻 R_{sh} 的电流^[16]。

当流进负载 R_L 的电流为 I ，负载的端电压为 V 时，则由图 2-5 可得^[17]：

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Sh} = I_{ph} - I_0(e^{q(V+IR_s)/nkT} - 1) - \frac{(IR_s + V)}{R_{Sh}}$$

$$P = IV = [I_{ph} - I_0(e^{q(V+IR_s)/nkT} - 1) - \frac{(IR_s + V)}{R_{Sh}}]V$$

$$= [I_{ph} - I_0(e^{q(V+IR_s)/nkT} - 1) - \frac{(IR_s + V)}{R_{Sh}}]^2 R_L \quad (2-2)$$

上式中 P 就是太阳电池被照明时在负载上得到的输出功率。

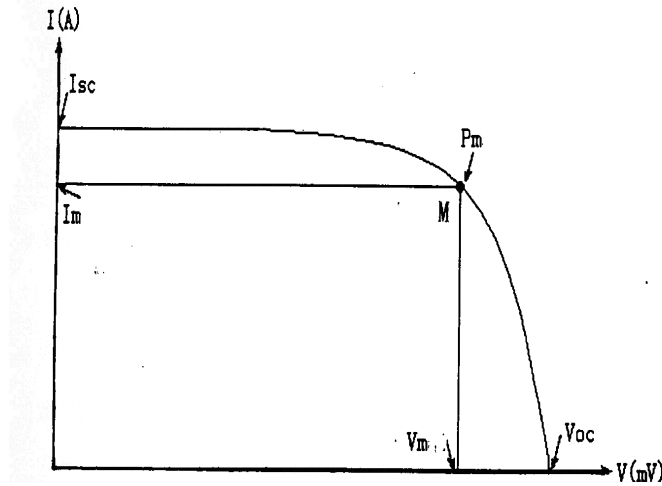


图 2-5 太阳电池的典型负载特性曲线

图中曲线与纵坐标的交点就是太阳电池的短路电流，分析短路电流的最方便的方法是将太阳光谱划分成许多微小光谱区域，每一微小区域只有很窄的波长范围，并计算出每一微小区域光谱所对应的电流，电池的总短路电流是全光谱贡献的总和，表达式如下：

$$I_{sc} = \int_0^{\infty} j_{sc}(\lambda) d\lambda \approx \int_{0.3\mu m}^{\lambda_0} j_{sc}(\lambda) d\lambda = \int_{0.3\mu m}^{\lambda_0} (1 - R(\lambda)) q F(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda \quad (2-3)$$

式中

λ_0 ——本征吸收波长极限；

$R(\lambda)$ ——半导体器件表面反射率；

$F(\lambda)$ ——太阳光谱中波长为 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 间隔内的光子数。

实际半导体表面的反射率与入射光的波长有关，反射率一般为 30~50%。为防止表面的反射，在半导体表面沉积折射率介于半导体折射率和空气折射率之间的透明薄

膜层。这个薄膜层称为减反射膜 (Antireflective coating) [18]。

设半导体、减反射膜、空气的折射率分别为 n_2 、 n_1 、 n_0 ，减反射膜厚度为 d_1 ，则反射率 R 为

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\theta}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\theta} \quad (2-4)$$

式中：

$$r_1 = (n_0 - n_1) / (n_0 + n_1)$$

$$r_2 = (n_1 - n_2) / (n_1 + n_2)$$

$$\theta = 2\pi n_1 d_1 / \lambda$$

λ — 波长

显然，减反射膜的厚度 d_1 为 $1/4$ 波长时， R 为最小。即 $d_1 = \frac{1}{4} \frac{\lambda}{n_1}$ 时，

$$R_{\min} = \left[\frac{(n_1^2 - n_0 n_2)}{(n_1^2 + n_0 n_2)} \right]^2 \quad (2-5)$$

一般在太阳光谱的峰值波长处，使得 R 变为最小，以此来决定 d_1 的值。

图中曲线与横坐标的交点就是太阳电池的开路电压，太阳电池的开路电压是当太阳电池处于开路状态时，对应光电流的大小产生的电动势。设 $I=0$ （开路）， $I_{ph}=I_{sc}$ ，则

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln[(I_{sc}/I_0) + 1] \quad (2-6)$$

在可以忽略串联、并联电阻的影响时， I_{sc} 为与入射光强度成正比的值，在很弱的阳光下， $I_{sc} \ll I_0$ ，因此

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \frac{I_{sc}}{I_0} = I_{sc} R_0 \quad (2-7)$$

其中 $R_0 = \frac{nkT}{qI_0}$ 。

在很强的阳光下， $I_{sc} \gg I_0$ ，

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (2-8)$$

由此可见，在较弱阳光时，硅太阳电池的开路电压随光的强度作近似直线的变化。而当有较强的阳光时， V_{oc} 则与入射光的强度的对数成正比。

当负载从零变到无穷大时，调节负载电阻的大小到某一值时，在曲线上得到一点 M ，对应的工作电流 I_m 和工作电压 V_m 之积最大。

$$P_m = I_m V_m \quad (2-9)$$

我们称 M 点为该太阳电池的最佳工作点， I_m 为最佳工作电流， V_m 为最佳工作电压， P_m 为最大输出功率。

最大输出功率与（ $V_{oc} \times I_{sc}$ ）之比为填充因数（FF），这是用以衡量太阳电池输出特性好坏的重要指标之一。

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \tag{2-10}$$

光电转换效率 EFF 为

$$EFF = \frac{P_m}{AP_{in}} = \frac{I_m V_m}{AP_{in}} \tag{2-11}$$

其中，A 为太阳电池的总面积， P_{in} 为单位面积光的入射功率。通常，温度和光强等会影响太阳电池的输出性能，图 2-6 给出了理想情况下电池伏安特性及功率随温度和光强的变化规律。

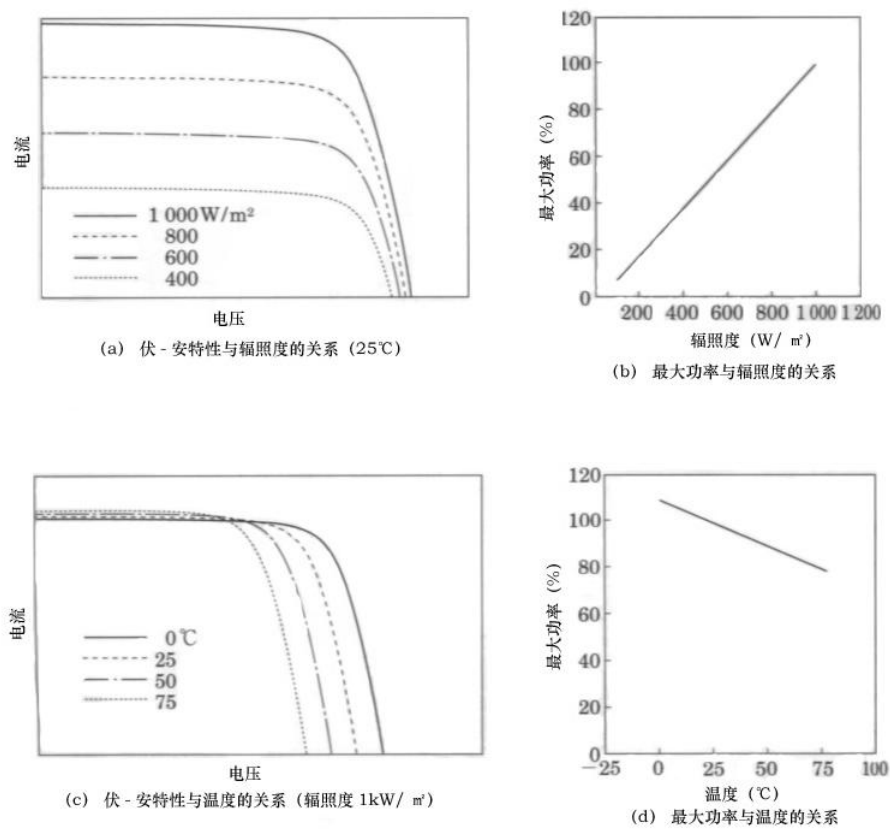


图 2-6 理想情况下电池伏安特性及功率随温度和光强的变化规律

1.4 丝网印刷晶体硅太阳能电池制备工艺

目前，丝网印刷晶体硅太阳能电池典型制备工艺顺序如图 2-7 所示^[19]：

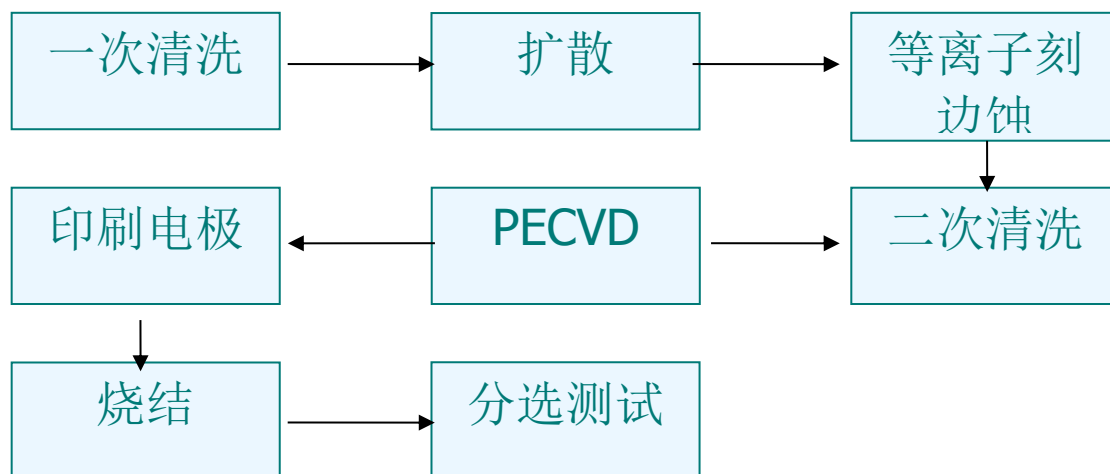
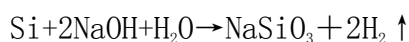


图 2-7 丝网印刷晶体硅太阳能电池典型制备工艺

下面就上述各工艺步骤逐一介绍。

1) 一次清洗和制绒

多线切割会在硅片表面产生损伤层，其厚度大概有 $10\text{--}20\ \mu\text{m}$ ，这一层必须要去除。单晶硅去除损伤层用的是 NaOH 溶液，其后的制绒步骤用的是 NaOH ，异丙醇和硅酸钠的混合溶液。，化学反应式为：



然后用 HF 清洗，作用是去除硅表面的硅酸钠和氧化物；再用 HCl 清洗，作用是去除硅片表面的金属离子，盐酸具有酸和络和剂的双重作用，氯离子能与 Pt^{2+} , Au^{3+} , Ag^+ , Cu^+ , Hg^{2+} 等金属离子形成可溶于水的络和物。

多晶硅制绒用的是硝酸和氢氟酸的混合溶液。

2) 扩散

这个工艺的目的是形成 p-n 结，在太阳能电池的扩散制结工艺中一般采用液态源扩散法。如果是在 p 型硅片中掺杂磷元素，液态源一般都是 POCl_3 ， POCl_3 液态源扩散方法具有生产效率较高， PN 结均匀，平整和扩散层表面良好等优点。除了 POCl_3 以外，还需要有携带气体——一般使用 N_2 （称为小氮），相关的反应气体 O_2 和直接通入炉内起稀释和控制作用的 N_2 （称为大氮）。

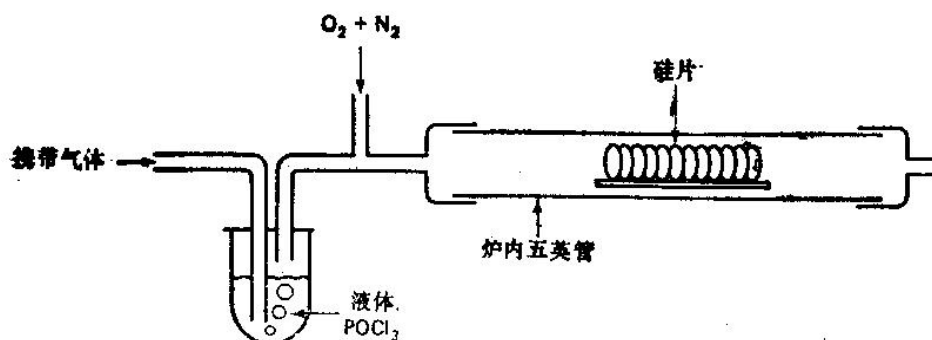
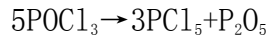
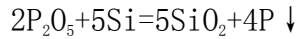


图 2-7 扩散装置示意图

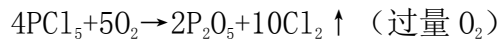
POCl₃在高温下（> 600℃）分解生成五氯化磷（PCl₅）和五氧化二磷（P₂O₅），其反应式如下：



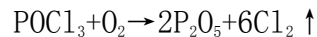
生成的 P₂O₅在扩散温度下与硅反应，生成二氧化硅（SiO₂）和磷原子，其反应式如下：



由上面反应式可以看出，POCl₃热分解时，如果没有外来的氧（O₂）参与其分解是不充分的，生成的 PCl₅是不易分解的，并且对硅有腐蚀作用，破坏硅片的表面状态。但在有外来 O₂存在的情况下，PCl₅会进一步分解成 P₂O₅并放出氯气（Cl₂）其反应式如下：



生成的 P₂O₅又进一步与硅作用，生成 SiO₂和磷原子，由此可见，在磷扩散时，为了促使 POCl₃充分的分解和避免 PCl₅对硅表面的腐蚀作用，必须在通氮气的同时通入一定流量的氧气。在有氧气存在时，POCl₃热分解的反应式为：

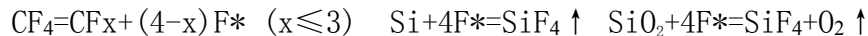


POCl₃分解产生的 P₂O₅淀积在硅片的表面，P₂O₅与硅反应生成 SiO₂和磷原子，并在硅片表面形成一层磷-硅玻璃，然后磷原子再向硅中进行扩散。

3) 等离子刻蚀

扩散时不论是单面扩散，还是双面都扩散，硅片的边缘都会有 p-n 结，这些 p-n 结的存在会造成电池片的边缘短路，所以要清除。

刻蚀的原理是利用 CF₄分子在高能量的电子的碰撞作用下分解成多种中性基团或离子，这些活性粒子由于扩散或在电场作用下到达 SiO₂表面，并在表面上发生化学反应。用化学式子表示为：



反应的实质是打破 C-F, Si-Si 键，形成挥发性的 Si-F 硅卤化物。在 CF₄中掺入 O₂是为了提高 Si 和 SiO₂的刻蚀速率。

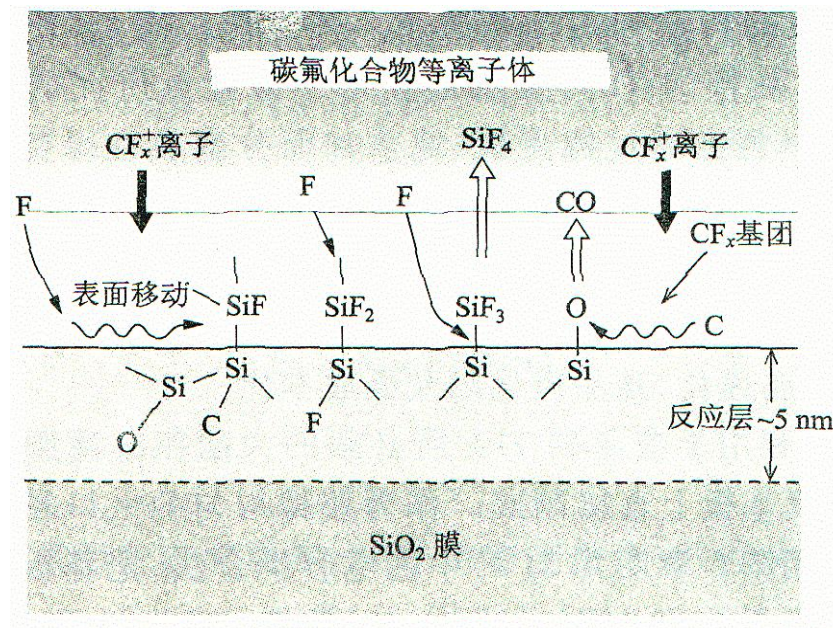
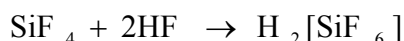
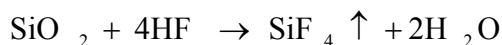


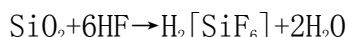
图 2-8 等离子刻蚀示意图

4) 二次清洗

在扩散过程中，硅片表面会形成一层含有磷元素的 SiO_2 ，称为磷硅玻璃。去磷硅玻璃主要是用氢氟酸（ HF ）和氟化铵（ NH_4F ）的混合溶液。氢氟酸能够溶解二氧化硅是因为氢氟酸能与二氧化硅作用生成易挥发的四氟化硅气体。若氢氟酸过量，反应生成的四氟化硅会进一步与氢氟酸反应生成可溶性的络合物六氟硅酸。



总的化学反应式为：

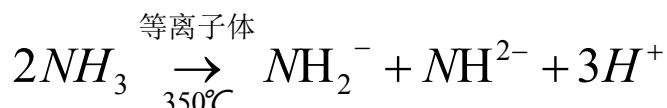
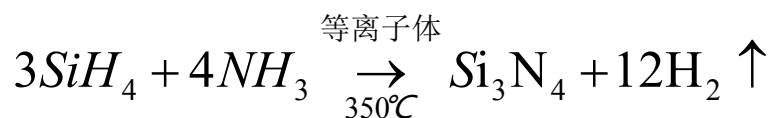
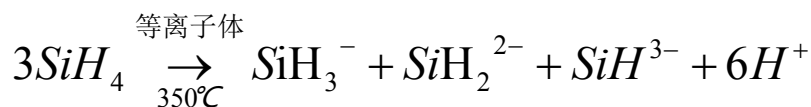


这个处理过程很短，只需 1-3 分钟。

5) PECVD

PECVD 是 Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition 的缩写，即“等离子增强化学气相沉积”。利用 PECVD 来沉积一层减反射膜，它除了能降低光的反射率，增加入射率，提高太阳光的利用率以外；还对电池表面能起到很好的钝化作用，降低表面复合几率并能有效阻止外界杂质（钠离子，掩蔽金属，水蒸气等）的入侵，提高电池的稳定性^[20, 21]。

PECVD 的反应过程如下：



二氧化硅、氮化硅等都是良好的减反射膜，但氮化硅膜（ SiN_xH_y ）的钝化效果更佳，化学稳定性好，除氢氟酸和热磷酸能缓慢腐蚀外，基本不与其它酸发生反应，而且工艺更简单可控。

6) 制作电极

制作电极也是制造太阳电池的关键工序，现在生产上用的比较多的是丝网印刷技术。为了引出太阳电池的电流，必须在电池上制作正、负两个电极，以使其产生的电流可汇集流出。 n^+/p 型的单晶硅太阳电池的负极在上边，称为上电极或正面电极；正极在下边，称为下电极或背电极。除了上下电极外，现在的生产工艺中还包括制作背电场。制作背电场可以形成良好的欧姆接触；还可以对穿透太阳电池片的光进行反射，改善电场的光谱响应曲线；所以通过背电场可以有效地改善电池的长波响应，提高电池的效率^[5]。

印刷的顺序依次是：背电极，背电场和上电极。使用的浆料分别是银铝浆，铝浆和银浆。这些浆料里面除了主要成分以外，还有其它十几种微量成分，这些微量成分的组成和比例对印刷效果有重要的影响。

7) 烧结和测试分选

印刷背电场和电极所用的都是液态浆料，为了使之与电池片形成可靠的合金接触，一般都通过烧结工艺，接着在标准测试条件（光强： $1000\text{W}/\text{m}^2$ ；光谱：AM1.5；温度： 25°C ）对其电性能进行测试，图 2-9 示出了实验制备的 $125\text{mm}\times 125\text{mm}$ 单晶硅太阳电池的外观。

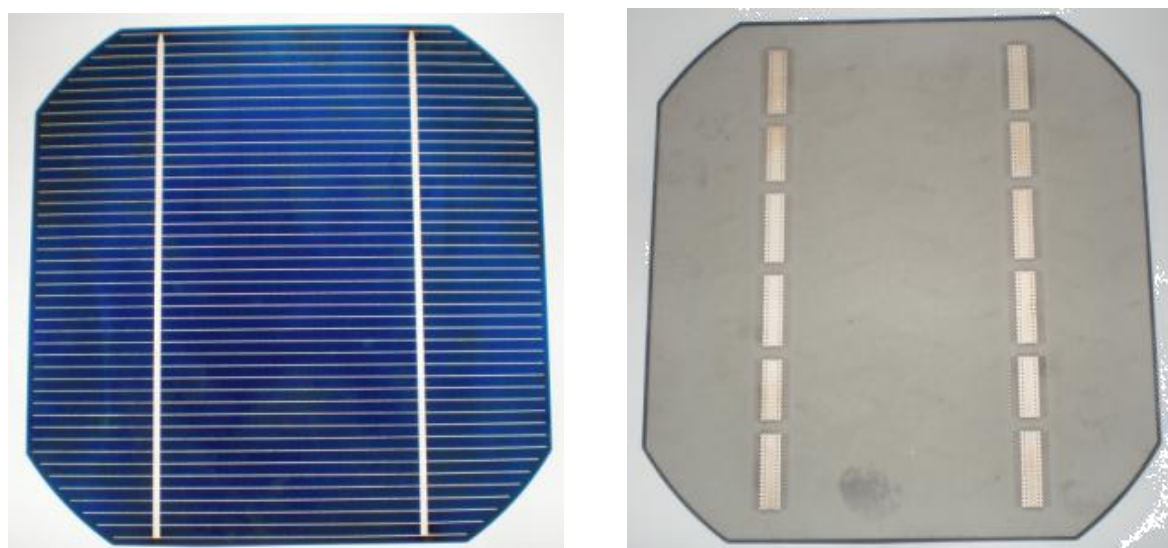


图 2-9 典型的 $125\text{mm}\times 125\text{mm}$ 单晶硅太阳电池的外观

1.5 晶体硅太阳电池组件

由于单片太阳电池输出电压较低，加之未封装的电池由于环境的影响电极容易脱落，因此必须将一定数量的单片电池采用串、并联的方式密封成组件，以避免电极接触和互连线受到腐蚀，另外封装也避免了电池碎裂，封装质量的好坏决定了晶体硅太阳电池组件的使用寿命。图 2-10 为组件的制备工艺流程。

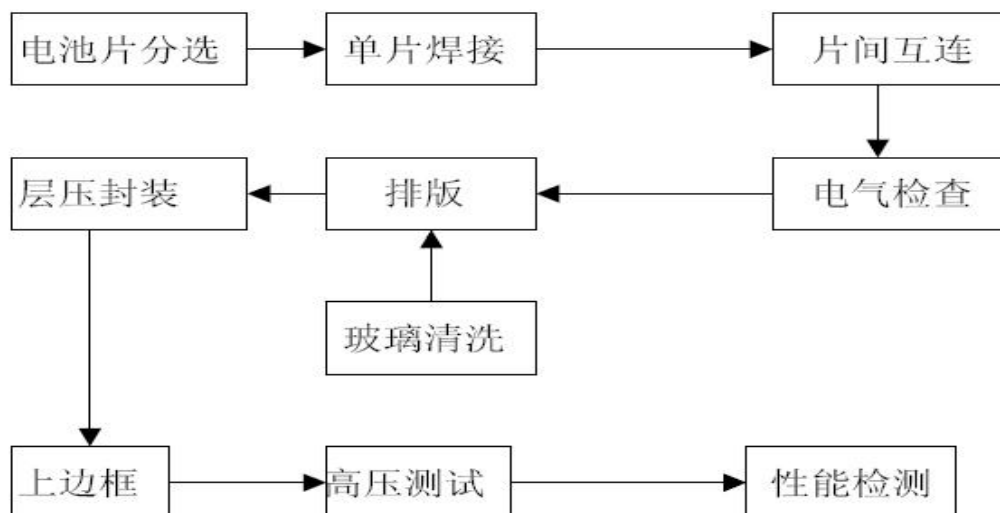


图 2-10 组件制备工艺流程

下面对上述工序予以简要介绍：

电池片分选：电池片分选是将性能相近的单体电池组合成组件，最大限度地降低串联损失，通常一个低功率的电池将是整个组件的输出功率降低。

单片焊接：将互连带焊接在电池的负极上。

片间互连：将已焊接好的单片电池串接起来，并进行电气检查。

排版：将已焊接好的电池串用汇流带连接起来，按照玻璃、EVA、电池、EVA 及 TPT 的顺序放置，并引出电极。

层压：将拼接好的电池组件热压密封。

高压测试：将组件引出线短路后接到高压测试仪的正极，将组件暴露的金属部分接到高压测试仪的负极，以不大于 500V/s 的速率加压，直到 1000 V+2 倍开路电压，维持 1 分钟，如果开路电压小于 50V，则所加电压为 500V。

组件测试：在标准测试条件（AM1.5，25℃，100mW/m²）下，对组件的电性能进行测试。

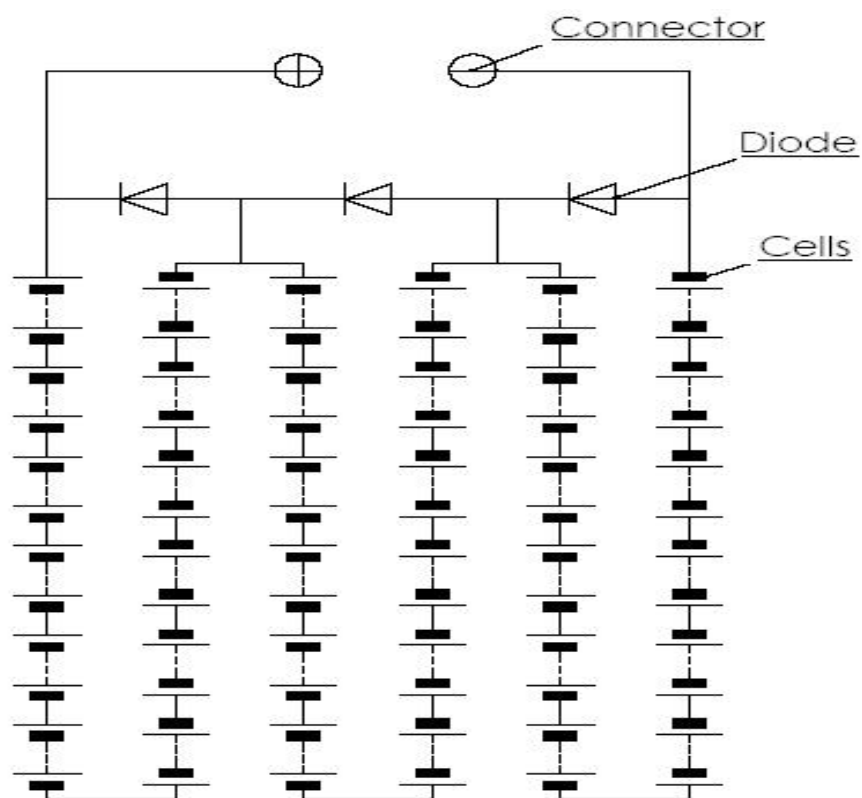


图 2-11 72 片 125mm×125mm 单晶硅太阳能电池串联组件的连接关系

图 2-11 示出了用 72 片 125mm×125mm 单晶硅太阳能电池串联组件的连接关系，其典型电性能参数如下^[22]：

最大输出功率：170 W；

开路电压：43.2V；

短路电流：5.12A

最佳工作电压：34.7V；

最佳工作电流：4.9A；

短路电流 (I_{sc}) 温度系数： $(0.065 \pm 0.015)\% / ^\circ\text{C}$

开路电压 (V_{oc}) 温度系数： $-(160 \pm 20)\text{mV} / ^\circ\text{C}$

功率的温度系数： $-(0.5 \pm 0.05)\% / ^\circ\text{C}$