

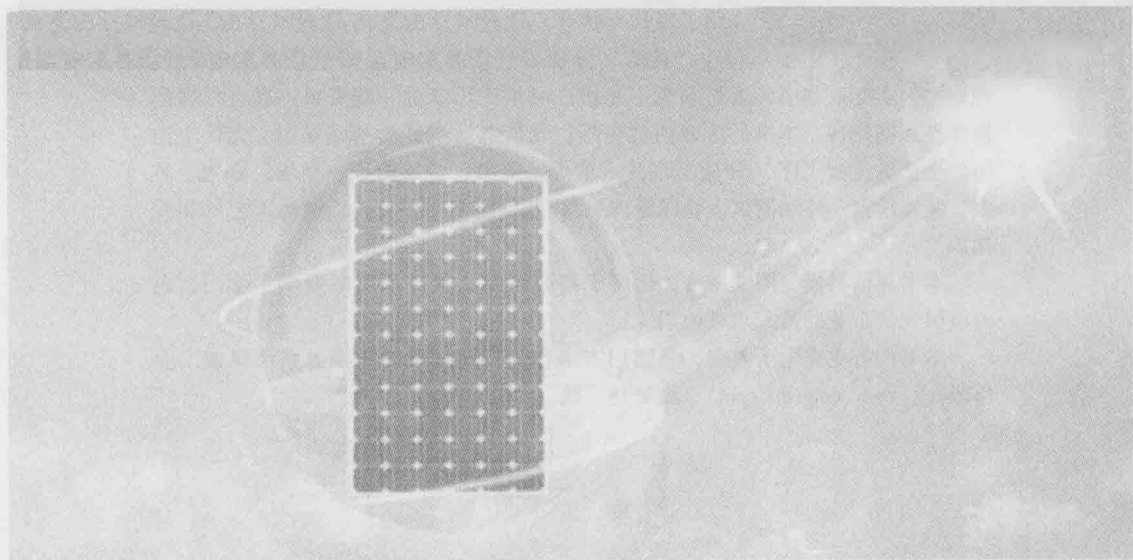
光伏产品工艺

GUANGFU CHANPIN GONGYI

张存彪 文其知 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



光伏产品工艺

张存彪 文其知 编



机械工业出版社

本书全面、详细地介绍了现代光伏产业比较成熟的光伏电池组件产品生产工艺。按照光伏电池组件生产流程,分项目分任务实施课程,对接生产岗位,理论结合实际。本书的素材来源于光伏产品生产厂家的—线资料,具有很强的操作性和实用性。本书的主要内容包括:光伏电池组件的基础知识、光伏电池组件生产的流程工序(分检与划片、单焊、穿串、叠层敷设、层压、修边、装框、装接线盒、终端测试、仓库管理),以及智能组件和滴胶板电池工艺的相关知识。

本书通俗易懂、图文结合,适用于高职高专光伏技术类专业学生学习,也可以供光伏企业的员工培训使用。

本书配有免费电子教案,凡选用本书作为授课用书的学校可登录机械工业出版社(www.cmpedu.com),注册并下载。

图书在版编目(CIP)数据

光伏产品工艺/张存彪 文其知编.—北京:机械工业出版社,2013.6
ISBN 978-7-111-41103-1

I. ①光… II. ①张… ②文… III. ①光电池—生产工艺—高等职业教育—教材 IV. ①TM914.05

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第109289号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:高倩 责任编辑:高倩 王荣

版式设计:常天培 责任校对:张征

封面设计:马精明 责任印制:张楠

涿州市京南印刷厂印刷

2013年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·10.5印张·254千字

0001—2000册

标准书号:ISBN 978-7-111-41103-1

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

在当今能源短缺，大力发展低碳经济的大背景下，世界各国都加紧了发展光伏产业的步伐。美国提出“太阳能先导计划”，意在降低太阳能光伏发电的成本，使其在2015年达到商业化竞争的水平；日本也提出了在2020年达到28GW的光伏发电总量的目标；欧洲光伏协会提出了“setfor2020”规划，规划在2020年让光伏发电做到商业化竞争。我国也在2009年提出了《太阳能光电建筑应用财政补助资金管理暂行办法》、“金太阳示范工程”等鼓励光伏发电产业发展的政策；2010年国务院颁布的《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》中明确提出要“开拓多元化的太阳能光伏光热发电市场”；2011年国务院制定的“十二五”规划纲要再次明确了要重点发展包括太阳能热利用和光伏光热发电在内的新能源产业。一系列的政策支持让我国光伏发电发展之路更加宽广。在行业快速发展的同时，专业技术人才短缺，从业人员技术水平良莠不齐等问题也逐渐突显出来。

职业教育的发展与行业密切相关，光伏作为新兴产业，各职业院校相关专业开设时间都不长，与教学配套的教材也很短缺。

“光伏产品工艺”是光伏技术类专业重要的专业核心课，具有很强的实践性。本书以光伏组件的生产过程为导向，把整个生产工艺流程和多家企业的实际生产工艺以及组件检测国家标准融入教材中，具有情景真实、过程可操作性强的特点。根据光伏组件的生产流程，采用项目导向的思路，本书将光伏组件的生产工艺流程（分检与划片、单焊、穿串、敷设、层压、修边、装框、装接线盒、终端测试、仓库管理等）分成八个项目精心设置，根据不同的项目设置不同的任务，分别讲解了各个项目的原理、工艺操作方法、设备使用与保养、常见问题及解决方法等内容，与此同时本书也介绍了常见光伏组件生产前的基本知识，不合格片重新利用制作滴胶板组件的相关知识，并简单介绍了智能组件和单片机的电量控制的知识。通过本课程的学习，可以使学生掌握光伏组件制备的基本知识、原理、操作工艺流程和设备的使用与保养等技术知识。

本着理论够用、技术过硬、侧重实践操作技能训练的原则，本书把岗位操作与实践操作技能训练融合，以专业学习和职业素养培育为主旨，突出专业性与职业性紧密融合的特点。

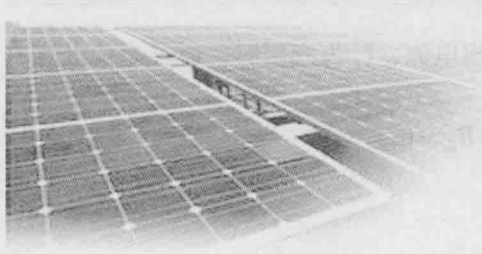
本书由张存彪、文其知编写。本书编写过程中得到了湖南神州光电能源有限公司、山西潞安太阳能科技有限公司、无锡尚德电力公司等单位的大力支持与帮助，在此表示感谢。在书中还引用了一些专家学者和技术工程师的资料，在此也表示感谢！

由于编者水平有限，书中错误和不足之处在所难免，恳请读者批评指正，不胜感谢。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
项目一 认识光伏电池组件及其生产流程	13
任务一 认识各种光伏电池组件	13
任务二 了解光伏电池组件的一般生产过程	21
项目二 分检与激光划片	26
任务一 电池片分检与分选仪操作	26
任务二 激光划片操作	35
任务三 激光划片机的使用与维护	38
项目三 焊接与互联	43
任务一 焊接前检查与准备	43
任务二 单片焊接	48
任务三 穿串与互联	52
项目四 叠层	57
任务一 叠层敷设	57
任务二 叠层测试与检验	62
项目五 层压	65
任务一 层压机的使用与维护	65
任务二 层压机故障与检修	70
任务三 EVA 胶膜	81
任务四 层压操作	86
任务五 层压测试与检验	94
项目六 装框	102
任务一 认识自动化组框生产设备	102
任务二 框材料的选取	109
任务三 装框操作	112
任务四 装框测试与检验	115
项目七 装接线盒	119
任务一 电池组件清理	119
任务二 安装接线盒	121
项目八 产品质量测试	132
任务一 电池组件检验前准备	132
任务二 光伏电池组件测试	137
项目九 光伏电池组件仓库管理	141
任务一 了解 7S 管理	141
任务二 了解光伏电池组件仓库管理	145
项目十 滴胶板电池组件	149
任务 了解滴胶板电池组件生产	149
参考文献	161



绪 论

本书以光伏电池组件的生产过程为导向，把整个生产工艺流程融入教学过程中，具有情景真实性、过程可操作性的特点。根据光伏电池组件的生产流程，采用项目导向的思路，将光伏电池组件的生产工艺流程（分检、划片、单焊、穿串、敷设、层压、修边、装框、装接线盒和终端测试等）分成九个项目精心设置，根据不同的项目设置不同的任务，分别讲解了各个项目的原理、工位操作方法、设备使用与保养、常见问题及解决方法等内容，为了更好地学习本书，我们在绪论部分，分两个任务来学习光伏电池组件的基础知识，以备在后续项目学习中应用。

一、光伏电池的基础知识

1. 光伏电池的发电原理

光伏电池在没有光照时，其特性可视为一个二极管，在没有光照时其正向偏压 U 与通过电流 I 的关系式为

$$I = I_0(e^{\beta U} - 1) \quad (0-1)$$

式中， I_0 和 β 为常数。

由半导体理论可知，二极管主要是由能隙为 $E_c - E_v$ 的半导体构成，如图 0-1 所示。 E_c 为半导体导带， E_v 为半导体价带。当入射光子能量大于能隙时，光子会被半导体吸收，产生电子和空穴对。电子和空穴对会分别受到 PN 结之内电场的影响而产生光电流。

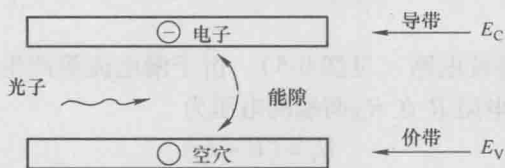


图 0-1 半导体能带图

假设光伏电池的理论模型是由一个理想电流源（光照产生光电流的电流源）、一个理想二极管、一个并联电阻 R_{sk} 与一个电阻 R_s 所组成，如图 0-2 所示。

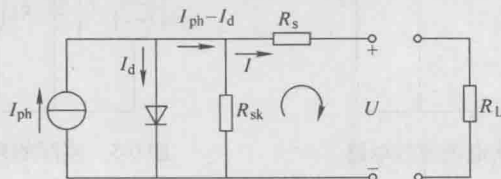


图 0-2 光伏电池的理论模型

图 0-2 中, I_{ph} 为光伏电池在光照时该等效电源输出电流, I_d 为光照时, 通过光伏电池内部二极管的电流。由基尔霍夫定律得

$$IR_s + U - (I_{ph} - I_d - I)R_{sk} = 0 \quad (0-2)$$

式中, I 为光伏电池的输出电流, U 为输出电压。

由式 (0-2) 可得

$$I \left(1 + \frac{R_s}{R_{sk}} \right) = I_{ph} - \frac{U}{R_{sk}} - I_d \quad (0-3)$$

假定 $R_{sk} = \infty$ 和 $R_s = 0$, 光伏电池可简化为图 0-3 所示电路。

这里, $I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0(e^{\beta U} - 1)$

在短路时, $U = 0$, $I_{ph} = I_{sc}$;

而在开路时, $I = 0$, $I_{sc} - I_0(e^{\beta U_{oc}} - 1) = 0$;

$$U_{oc} = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (0-4)$$

式 (0-4) 即为在 $R_{sk} = \infty$ 和 $R_s = 0$ 的情况下, 光伏电池的开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 的关系式。其中, U_{oc} 为开路电压, I_{sc} 为短路电流, 而 I_0 、 β 为常数。

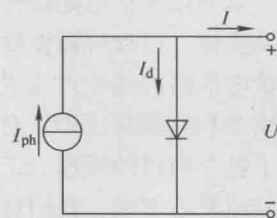


图 0-3 理想光伏电池电路模型

2. 影响光伏电池发电的因素

(1) 标准测试条件

- 1) 光源辐照度: 1000 W/m^2 。
- 2) 测试温度: $(25 \pm 20) ^\circ\text{C}$ 。
- 3) AM1.5 地面太阳光谱辐照度分布。

(2) 光伏电池的等效电路

1) 理想光伏电池的等效电路 (见图 0-4)。相当于一个电流为 I_{ph} 的恒流电源与一只正向二极管并联, 流过二极管的正向电流称为暗电流 I_d , 流过负载的电流为 I , 负载两端的电压为 U 。

2) 实际光伏电池的等效电路 (见图 0-5)。由于漏电流等产生的旁路电阻 R_{sh} , 体电阻和电极的电阻产生的串联电阻 R_s 在 R_{sh} 两端的电压为

$$U_j = (U + I_{rs})$$

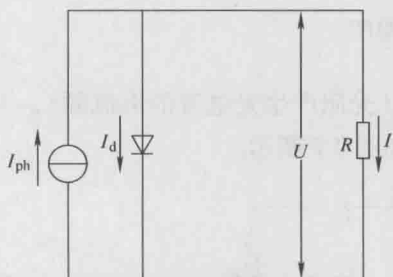


图 0-4 理想的光伏电池等效电路

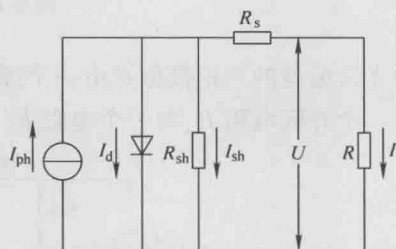


图 0-5 实际的光伏电池等效电路

因此流过旁路电阻 R_{sh} 的电流为

$$I_{sh} = (U + I_{rs}) / R_{sh}$$

流过负载的电流为

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh}$$

暗电流 I_d 是注入电流和复合电流之和, 可以简化为单指数形式:

$$I_d = I_{oo} [\exp(qU_j/A_0kT) - 1] \quad (0-5)$$

式中, I_{oo} 为光伏电池在无光照时的饱和电流; A_0 为结构因子, 它反映了 PN 结的结构完整性对性能的影响; k 为玻耳兹曼常数。

在理想情况下, $R_{sh} \rightarrow \infty$, $R_s \rightarrow 0$, 由此得到

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_d \\ &= I_{ph} - I_{oo} [\exp(qU_j/A_0kT) - 1] \end{aligned}$$

在负载短路时, 即 $U_j = 0$ (忽略串联电阻), 便得到短路电流, 其值恰好与光电流相等, 即

$$I_{sc} = I_{ph}$$

因此得出

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_d \\ &= I_{sc} - I_{oo} [\exp(qU_j/A_0kT) - 1] \end{aligned}$$

当负载 $R \rightarrow \infty$ 时, 输出电流 $\rightarrow 0$, 便得到开路电压 U_{oc} , 其值由下式确定:

$$U_{oc} = A_0kT/q [\ln(I_{sc}/I_{oo}) + 1]$$

3) 伏安特性曲线 (见图 0-6)。受光照的光伏电池, 在一定的温度和辐照度以及不同的外电路负载下, 流入负载的电流 I 和电池端电压 U 的关系曲线称为伏安特性曲线。

4) 开路电压。在一定的温度和辐照度条件下, 光伏发电器在空载 (开路) 情况下的端电压称为开路电压, 通常用 U_{oc} 来表示。光伏电池的开路电压与电池面积大小无关, 通常单晶硅光伏电池的开路电压约为 450 ~ 600mV, 光伏电池的开路电压与入射光谱辐照度的对数成正比。

5) 短路电流。在一定的温度和辐照条件下, 光伏发电器在端电压为零时的输出电流称为短路电流, 通常用 I_{sc} 来表示。 I_{sc} 与光伏电池的面积大小有关, 面积越大, I_{sc} 越大。一般 1cm^2 的光伏电池 I_{sc} 值约为 16 ~ 30mA。 I_{sc} 与入射光的辐照度成正比。

6) 最大功率点。在光伏电池伏安特性曲线上对应最大功率的点称为最大功率点, 又称最佳工作点。

7) 最佳工作电压。光伏电池伏安特性曲线上最大功率点所对应的电压称为最佳工作电压, 通常用 U_m 表示。

8) 最佳工作电流。光伏电池伏安特性曲线上最大功率点所对应的电流称为最佳工作电流, 通常用 I_m 表示。

9) 转换效率。受光照光伏电池的最大功率与入射到该光伏电池上的全部辐射功率的百分比称为转换效率, 通常用 η 表示。

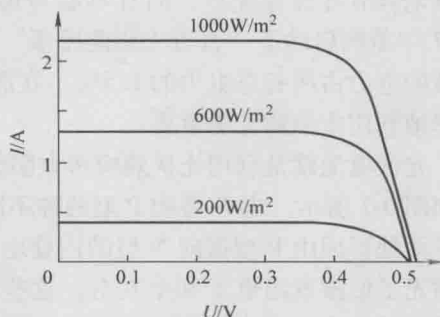


图 0-6 不同辐照度下电池的伏安特性曲线

$$\eta = U_m I_m / A_t P_{in} \quad (0-6)$$

式中, U_m 和 I_m 分别为最大输出功率点的电压和电流; A_t 为光伏电池的总面积; P_{in} 为单位面积太阳入射光的功率。

10) 填充因子 (曲线因子)。光伏电池的最大功率与开路电压和短路电流乘积之比, 通常用 FF (或 CF) 表示:

$$FF = I_m U_m / I_{sc} U_{oc} \quad (0-7)$$

式中, $I_{sc} U_{oc}$ 是光伏电池的极限输出功率; $I_m U_m$ 是光伏电池的最大输出功率。填充因子是表征光伏电池性能优劣的一个重要参数。

11) 电流温度系数。在规定的试验条件下, 被测光伏电池温度每变化 1K, 光伏电池短路电流的变化值, 通常用 α 表示。对于一般晶体硅电池, 有

$$\alpha = 0.1\% / K$$

12) 电压温度系数。在规定的试验条件下, 被测光伏电池温度每变化 1K, 光伏电池开路电压的变化值, 通常用 β 表示。对于一般晶体硅电池, 有

$$\beta = -0.38\% / K$$

二、光伏电池

太阳能作为最理想的可再生能源, 具有“取之不尽, 用之不竭”的特点, 而利用太阳能发电具有环保等优点, 而且不必考虑其安全性问题。所以在发达国家得到了高度重视, 1997 年美国启动了“百万太阳能屋顶”计划, 欧洲联盟国家在 2010 年就实现了太阳能光电转换的电力占有总电力的 1.5%。在能源短缺、环境保护问题日益严重的我国, 低成本高效率地利用太阳能尤为重要。

光伏电池就是利用光伏效应将太阳能直接转换为电能的一种装置。常规光伏电池简单装置如图 0-7 所示。当 N 型和 P 型两种不同型号的半导体材料接触后, 由于扩散和漂移作用, 在界面处形成由 P 型指向 N 型的内建电场。当光照在光伏电池的表面后, 能量大于禁带宽度的光子便激发出电子和空穴对, 这些非平衡的少数载流子在内电场的作用下分离, 在电池的上、下两极累积, 这样电池便可以给外界负载提供电流。

1839 年, 法国的 Becquerel 第一次在化学电池中观察到光伏效应。1876 年, 在固态硒 (Se) 的系统中也观察到了光伏效应, 随后开发出 Se/CuO 光电池。有关硅光电池的报道出现于 1941 年。贝尔实验室 Chapin 等人于 1954 年开发出效率为 6% 的单晶硅光电池, 现代硅光伏电池时代从此开始。硅光伏电池于 1958 年首先在航天器上得到应用。在随后的 10 多年里, 硅光伏电池在空间应用不断扩大, 工艺不断改进, 电池设计逐步定型。这是硅光伏电池发展的第一个时期。第二个时期开始于 20 世纪 70 年代初, 在这个时期, 背表面场、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

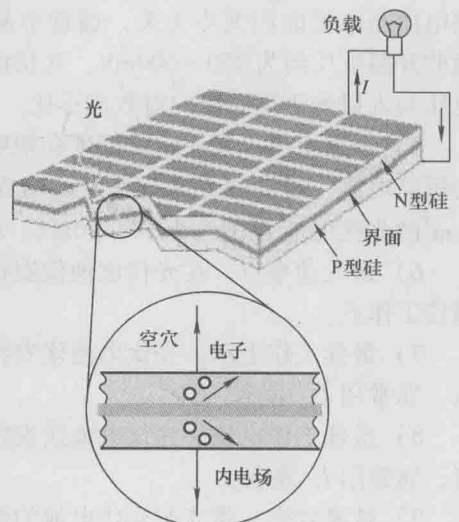


图 0-7 常规光伏电池简单装置

中, 光伏电池转换效率有了较大提高。与此同时, 硅光伏电池开始在地面应用, 而且不断扩大, 到 20 世纪 70 年代末地面用光伏电池产量已经超过空间电池产量, 并促使成本不断降低。20 世纪 80 年代初, 硅光伏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。

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, 如肖特基 (Ms) 电池, MIS 电池, MINP 电池; 异质结电池 (如 ITO (n)/Si (p), a-Si/c-Si, Ge/Si) 等, 其中同质 PN 结电池结构自始至终占主导地位, 其他结构对太阳电池的发展也有重要影响。以材料区分, 有晶硅电池、非晶硅薄膜电池、铜铟硒 (CIS) 电池、碲化镉 (CdTe) 电池和砷化镓电池等。其中, 以晶硅电池为主导, 由于硅是地球上储量第二大元素, 作为半导体材料, 人们对它研究得最多、技术最成熟, 而且晶硅性能稳定、无毒, 因此成为光伏电池研究开发、生产和应用中的主体材料。

1. 地面应用推动各种新型电池的出现和发展

晶硅电池在 20 世纪 70 年代初引入地面应用。在石油危机和降低成本的推动下, 光伏电池开始一段蓬勃发展的时期, 这段时期不但出现了许多新型电池, 而且引入许多新技术。例如:

1) 背表面电场 (BSF) 电池。在电池的背面接触区引入同型重掺杂区, 由于改进了接触区附近的收集性能而增加电池的短路电流; 背场的作用可以降低饱和电流, 从而改善开路电压, 提高电池效率。

2) 紫光电池。这种电池最早 (1972 年) 是为通信卫星开发的。因其浅结 ($0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$) 密栅、减反射 (Ta_2O_5 短波透过好) 而获得高效率。在一段时间里, 浅结被认为是高效的关键技术之一而被采用。

3) 表面织构化电池。这种电池也称绒面电池, 最早 (1974 年) 也是为通信卫星开发的。其 AMO 时电池效率 $\eta \geq 15\%$, AMI 时 $\eta > 18\%$ 。这种技术后来被高效电池和工业化电池普遍采用。

4) 异质结光伏电池。异质结光伏电池是不同半导体材料在一起形成的光伏电池, 如 SnO_2/Si 、 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 、 $(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)/\text{Si}$ 电池等。由于 SnO_2 、 In_2O_3 、 $(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$ 等带隙宽, 透光性好, 制作电池工艺简单, 曾引起许多研究者的兴趣。目前因效率不高等问题研究者已不多, 但 SnO_2 、 In_2O_3 、 $(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$ 是许多薄膜电池的重要构成部分, 作收集电流和窗口材料用。

5) MIS 电池。这种电池是肖特基 (Ms) 电池的改型, 即在金属和半导体之间加入 $1.5 \sim 3.0 \text{nm}$ 绝缘层, 使 Ms 电池中多子支配暗电流的情况得到抑制, 而变成少子隧穿^①决定暗电流, 与 PN 结类似。

其中 I 层起到减少表面复合的作用。经过改进的 MIS 电池正面有 $20 \sim 40 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 膜, 在膜上真空蒸发金属栅线, 整个表面再沉积 SiNX 薄膜。 SiNX 薄膜的作用是: ① 保护电池, 增加耐候性; ② 作为减反射层 (ARC), 降低薄膜复合速度; ③ 在 P 型半导体一侧产生一

① 半导体中的少数载流子 (电子/空穴) 穿越势垒 (也称势垒穿透), 好像从大山隧道通过一般, 这就是少子隧穿。

个 N 型导电反型层。对效率产生决定性影响的是在介电层中使用了银。该电池的优点是工艺简单, 但反型层的薄层电阻太高。

6) MINP 电池。可以把这种电池看做是 MIS 电池和 PN 结的结合, 其中氧化层对表面和晶界复合起抑制作用。这种电池对后来的高效电池起到过渡作用。

7) 聚光电池。聚光电池的特点是电池面积小, 从而可以降低成本, 同时在高光强下可以提高电池开路电压, 从而提高转换效率, 因此聚光电池一直受到重视。比较典型的聚光电池是斯坦福大学的点接触聚光电池, 其结构与非聚光点接触电池结构相同, 不同处是采用电阻率为 $200\Omega \cdot \text{cm}$ 的高阻 N 型材料并使电池厚度降低到 $100 \sim 160\mu\text{m}$, 使体内复合进一步降低。这种电池在 140 个太阳下转换效率达到 26.5%。

2. 晶硅光伏电池向高效化和薄膜化方向发展

晶硅电池在过去 20 年里有了很大发展, 许多新技术的采用和引入使光伏电池的效率有了很大提高。在早期的硅电池研究中, 人们探索各种各样的电池结构和技术来改进电池性能, 如背表面场、浅结、绒面、氧化膜钝化、Ti/Pd 金属化电极和减反射膜等。后来的高效电池是在这些早期实验和理论基础上的发展起来的。

(1) 单晶硅高效电池 单晶硅高效电池的典型代表是斯坦福大学的背面点接触电池 (Point-Contact Cell, PCC), 新南威尔士大学 (UNSW) 的钝化发射区电池 (PESC、PERC、PERL 电池) 以及德国 Fraunhofer 太阳能研究所的局域化背表面场 (LBSF) 电池等。

1) 新南威尔士大学高效电池。

a. 钝化发射区电池 (PESC): PESC 于 1985 年问世, 1986 年 V 形槽技术又被应用到该电池上, 效率突破 20%。V 形槽对电池的贡献是: 减少电池表面反射; 垂直光线在 V 形槽表面折射后以 41° 角进入硅片, 使光生载流子更接近发射结, 提高了收集效率, 对低寿命衬底尤为重要; V 形槽可使发射极横向电阻降低至原来的 $1/3$ 。由于 PESC 的最佳发射极方块电阻在 $150\Omega/\square$ 以上, 降低发射极电阻可提高电池填充因子。

在发射结磷扩散后, μm 数量级厚的铝层沉积在电池背面, 再热生长 10nm 表面钝化氧化层, 并使背面铝和硅形成合金, 正面氧化层可大大降低表面复合速度, 背面铝合金可吸除体内杂质和缺陷, 因此开路电压得到提高。早期 PESC 采用浅结, 然而后来的研究证明, 浅结只是对没有表面钝化的电池有效, 对有良好的表面钝化的电池是不必要的, 而氧化层钝化的性能和铝吸杂的作用能在较高温度下增强, 因此最佳 PESC 的发射结深增加到 $1\mu\text{m}$ 左右。值得注意的是, 目前所有效率超过 20% 的电池都采用深结而不是浅结。浅结电池已成为历史。

PESC 的金属化由剥离方法形成 Ti-Pd 接触, 然后电镀 Ag 构成。这种金属化有相当大的厚/宽比和很小的接触面积, 因此这种电池可以做到 $FF \geq 83\%$ 的填充因子和 $\eta \geq 20.8\%$ (AM1.5 时) 的效率。

b. 钝化发射区和背表面电池 (PERC 电池): 铝背面吸杂是 PESC 的一个关键技术。然而由于背表面的高复合和低反射, 它成了限制 PESC 技术进一步提高的主要因素。PERC 和 PERL 电池成功地解决了这个问题。它用背面点接触来代替 PESC 的整个背面铝合金接触, 并用 TCA (氯乙烷) 生长的 110nm 厚的氧化层来钝化电池的正表面和背表面。TCA 氧化产生极低的界面态密度, 同时还能排除金属杂质和减少表面层错, 从而能保持衬底原有的少子寿命。由于衬底的高少子寿命和背面金属接触点处的高复合, 背面接触点设计成 2mm 的大间距和 $200\mu\text{m}$ 的接触孔径。接触点间距需大于少子扩散长度以减小复合。这种电池达到了

大约 700mV 的开路电压和 22.3% 的效率。然而，由于接触点间距太大，串联电阻高，因此填充因子较低。

c. 钝化发射区和背面局部扩散电池 (PERL 电池)：在背面接触点下增加一个浓硼扩散层，以减小金属接触电阻。由于硼扩散层减小了有效表面复合，接触点间距可以减小到 $250\mu\text{m}$ 、接触孔径减小到 $10\mu\text{m}$ 而不增加背表面的复合，从而大大减小了电池的串联电阻。PERL 电池达到了 702mV 的开路电压和 23.5% 的效率。PERC 和 PERL 电池的另一个特点是其极好的陷光效应。由于硅是间接带隙半导体，对红外的吸收系数很低，一部分红外光可以穿透电池而不被吸收。理想情况下入射光可以在衬底材料内往返穿过 $4n^2$ 次， n 为硅的折射率。PERL 电池的背面，由铝在 SiO_2 上形成一个很好反射面，入射光在背表面上反射回正表面，由于正表面的倒金字塔结构，这些反射光的一大部分又被反射回衬底，如此往返多次。美国 Sandia 国家实验室的 P. Basore 博士发明了一种红外分析的方法来测量陷光性能，测得 PERL 电池背面的光谱反射比大于 95%，陷光系数大于往返 25 次。因此 PERL 电池的红外响应极高，也特别适应于对单色红外光的吸收。在 $1.02\mu\text{m}$ 波长的单色光下，PERL 电池的转换效率达到 45.1%。这种电池 AM0 下效率也达到了 20.8%。

d. 埋栅电池：UNSW 开发的激光刻槽埋栅电池，在发射结扩散后，用激光在前面刻出 $20\mu\text{m}$ 宽、 $40\mu\text{m}$ 深的沟槽，将槽清洗后进行浓磷扩散。然后在槽内镀出金属电极。电极位于电池内部，减少了栅线的遮蔽面积。电池背面与 PESC 相同，由于刻槽会引进损伤，其性能略低于 PESC 电池。电池效率达到 19.6%。

2) 斯坦福大学的背面点接触电池 (PCC)。点接触电池的结构与 PERL 电池一样，用 TCA 生长氧化层钝化电池正反面。为了减少金属条的遮光效应，金属电极设计在电池的背面。电池正面采用由光刻制成的金字塔 (绒面) 结构。位于背面的发射区被设计成点状、 $50\mu\text{m}$ 间距、 $10\mu\text{m}$ 扩散区和 $5\mu\text{m}$ 接触孔径，基区也做成同样的形状，这样可减小背面复合。衬底采用 n 型低阻材料 (取其表面及体内复合均低的优势)，衬底减薄到约 $100\mu\text{m}$ ，以进一步减小体内复合。这种电池的转换效率在 AM1.5 下为 22.3%。

3) 德国 Fraunhofer 太阳能研究所的深结局部背场电池 (LBSF 电池)。LBSF 电池的结构与 PERL 电池类似，也采用 TCA 氧化层钝化和倒金字塔正面结构。由于背面硼扩散一般造成高表面复合，局部铝扩散被用来制作电池的表面接触， $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 电池效率达到 23.3% ($U_{oc} = 700\text{mV}$, $I_{sc} = 41.3\text{mA}$, $FF = 0.806$)。

4) 日本 SHARP 公司的 C-Si/ $\mu\text{c-Si}$ 异质 pp+ 结高效电池。SHARP 公司能源转换实验室的高效电池，前面采用绒面结构化，在 SiO_2 钝化层上沉积 SiN 为减反射层 (ARC)，后面用 RF-PECVD 掺硼的 $\mu\text{c-Si}$ 薄膜作为背场，用 SiN 薄膜作为后表面的钝化层，铝层通过 SiN 上的孔与 $\mu\text{c-Si}$ 薄膜接触。 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 电池在 AM1.5 条件下的效率达到 21.4% ($U_{oc} = 669\text{mV}$, $I_{sc} = 40.5\text{mA}$, $FF = 0.79$)。

5) 我国单晶硅高效电池。我国在“八五”和“九五”期间也进行了高效电池研究，并取得了可喜成果。近年来硅电池的一个重要进展来自于表面钝化技术的提高。从钝化发射区光伏电池 (Passivated Emitter Solar Cell, PESC) 的薄氧化层 ($< 10\text{nm}$) 发展到 PCC、PERC、PERL 电池。电池的厚氧化层 (110nm)。热氧化钝化表面技术已使表面态密度降到 $10^{10}/\text{cm}^2$ 以下，表面复合速度降到 100cm/s 以下。此外，表面 V 形槽和倒金字塔技术，双层减反射膜技术的提高和陷光理论的完善也进一步减小了电池表面的反射和对红外光的吸收。低

成本高效硅电池也得到了飞速发展。

(2) 多晶硅高效电池 多晶硅光伏电池的出现主要是为了降低成本,其优点是能直接制备出适于规模化生产的大尺寸方形硅锭,设备比较简单,制造过程简单、省电、节约硅材料,对材质要求也较低。晶界及杂质影响可通过电池工艺改善;由于材质和晶界影响,电池效率较低。电池工艺主要采用吸杂、钝化和背场等技术。

近年来吸杂工艺再度受到重视,包括三氯氧磷扩散及铝吸杂工艺。吸杂工艺也在微电子器件工艺中得到应用,可见其对纯度达到一定水平的单晶硅硅片也有作用,但其所用的条件未必适用于光伏电池,因而要研究适合光伏电池专用的吸杂工艺。研究证明,在多晶硅光伏电池上,不同材料的吸杂作用是不同的,特别是对碳含量高的材料就显不出磷吸杂的作用。有学者提出了磷吸杂模型,即吸杂的速率受控于以下两个步骤:

- 1) 金属杂质的释放/扩散决定了吸杂温度的下限。
- 2) 分凝模型控制了吸杂的最佳温度。

另有学者提出,在磷扩散时,硅的自间隙电流的产生是吸杂机制的基本因素。

常规铝吸杂工艺是在电池的背面蒸镀铝膜后经过烧结形成,也可同时形成电池的背场。近几年在吸杂上的工作证明,它对高效单晶硅光伏电池及多晶硅光伏电池都会产生一定的作用。

钝化是提高多晶硅质量的有效方法。一种方法是采用氢钝化,钝化硅体内的悬挂键等缺陷。在晶体生长中受应力等影响造成缺陷越多的硅材料,氢钝化的效果越好。氢钝化可采用离子注入或等离子体处理。在多晶硅光伏电池表面采用 PECVD 法镀上一层氮化硅减反射膜,由于硅烷分解时产生氢离子,对多晶硅可产生氢钝化的效果。

在高效光伏电池上常采用表面氧钝化的技术来提高光伏电池的效率,近年来在光伏级的晶体硅材料上使用也有明显的效果,尤其采用热氧化法效果更明显。使用 PECVD 法在更低的温度下进行表面氧化,近年来也被使用,具有一定的效果。

多晶硅光伏电池的表面由于存在多种晶向,不如(100)晶向的单晶硅那样能经由腐蚀得到理想的绒面结构,因而对其表面进行各种处理以达减反射的作用也成为近期的研究目标,其中采用多刀砂轮进行表面刻槽,对 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 面积硅片的工序时间可降到30s,具有了一定的实用潜力。

多孔硅作为多晶硅光伏电池的减反射膜具有实用意义,其减反射的作用已能与双重减反射膜相比,所得多晶硅电池的效率也能达到13.4%。我国北京有色金属研究总院及中科院感光化学研究所共同研制的在丝网印刷的多晶硅光伏电池上使用多孔硅也已达到接近实用的结果。

由于多晶硅材料制作成本低于单晶硅直拉材料,因此多晶硅组件比单晶硅组件具有更大的降低成本的潜力,因而提高多晶硅电池效率的研究工作也受到普遍重视。近10年来,多晶硅高效电池的发展很快,其中比较有代表性有 Geogia Tech 电池、UNSW 电池和 Kysera 电池等。

1) Geogia Tech 电池。美国 Geogia 工业大学光伏中心使用电阻率 $0.65\Omega \cdot \text{cm}$ 、厚度 $280\mu\text{m}$ 的热交换法(Heat Exchange Method, HEM)多晶硅片制作电池, $n+$ 发射区的形成和磷吸杂结合,采用快速热过程制备铝背场,用 lift-off 法制备 Ti/Pd/Ag 前电极,并加双层减反射膜。 1cm^2 电池的效率 AM1.5 下达到18.6%。

2) UNSW 电池。UNSW 光伏中心的高效多晶硅电池工艺基本上与 PERL 电池类似,只是其表面织构化不是倒金字塔,而是用光刻和腐蚀工艺制备的蜂窝结构。多晶硅片由意大利的 Eurosolare 提供, 1cm^2 电池的效率 AM1.5 下达到 19.8%, 这是目前水平最高的多晶硅电池的研究结果。该工艺打破了多晶硅电池不适合采用高温过程的传统观念。

3) Kysera 电池。日本 kyocera 公司在多晶硅高效电池上采用体钝化和表面钝化技术, PECVD SiN 膜既作为减反射膜, 又作为体钝化措施, 表面织构化采用反应性粒子刻边技术。背场则采用丝印铅浆烧结形成。电池前面栅线也采用丝印技术。 $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 大面积多晶硅电池效率达 17.1%。目前日本正计划实现这种电池的产业化。

4) 我国多晶硅电池。北京有色金属研究总院在多晶硅电池方面做了大量研究工作, 目前 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 电池效率达到 11.8%。北京市太阳能研究所在“九五”期间开展了多晶硅电池研究, 1cm^2 电池效率达到 14.5%。我国中试生产的 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 多晶硅太阳电池的效率为 10% ~ 11%, 最高效率为 12%。

(3) 多晶硅薄膜电池 自 20 世纪 70 年代以来, 为了大幅度降低光伏电池的成本, 光伏界一直在研究开发薄膜电池, 并先后开发出非晶硅薄膜电池、碲化镉 (CdTe) 电池和铜铟硒 (CIS) 电池等。特别是非晶硅电池, 20 世纪 80 年代初问世, 很快实现了商业化生产。1987 年, 非晶硅电池的市场份额超过 40%, 但非晶硅电池由于效率低、不稳定 (光衰减), 市场份额逐年降低, 1998 年市场份额降为 13%: CdTe 电池性能稳定, 但由于资源有限和 Cd 毒性大, 近 10 年来市场份额一直维持在 13% 左右; CIS 电池的实验室效率不断攀升, 最近达到 18%, 但由于中试产品的重复性和一致性没有根本解决, 产业化进程一再推后, 至今仍停留在实验室和中试阶段。与此同时, 晶体硅电池的效率不断提高, 技术不断改进, 加上晶硅稳定、无毒、材料资源丰富, 人们开始考虑开发多晶硅薄膜电池。多晶硅薄膜电池既具有晶硅电池的高效、稳定、无毒和资源丰富的优势, 又具有薄膜电池工艺简单、节省材料、大幅度降低成本的优点, 因此其研究开发成为近几年的热点。另一方面, 采用薄片硅技术, 避开控制单晶硅或浇铸多晶硅、切片的昂贵工艺和材料浪费的缺点, 达到降低成本的目的。严格地说, 后者不属于薄膜电池技术, 只能算作薄片化硅电池技术。

1) CVD 多晶硅薄膜电池。各种 CVD (PECVD、RTCVD、cat-CVD、Hot-wire CVD 等) 技术被用来生长多晶硅薄膜, 在实验室内有些技术获得了重要的结果。例如, 日本 kaneka 公司采用 PECVD 技术在 550°C 以下和玻璃衬底上制备出具有 pin 结构的多晶硅薄膜电池, 电池总厚度约 $2\mu\text{m}$, 效率达到 10%; 德国 Fraunhofer 太阳能研究所使用 SiO_2 和 SiN 包覆陶瓷或 SiC 包覆石墨为衬底, 用快速热化学气相沉积 (RTCVD) 技术沉积多晶硅薄膜, 硅膜经过区熔再结晶 (ZMR) 后制备光伏电池, 两种衬底的电池效率分别达到 9.3% 和 11%。

2) 多层多晶硅薄膜电池。UNSW 于 1994 年提出一种多层多晶硅薄膜电池的概念和技术, 并于同年与 Pacific Power 公司合作成立 kcific solar 公司开发这种电池。最近报道, 该公司已经生产出 $30\text{cm} \times 40\text{cm}$ 的中试电池组件。薄膜采用 CVD 工艺沉积, 衬底为玻璃, 通过激光刻槽和化学镀膜实现接触、互联和集成。据称, 电池组件的主要成本是封装玻璃, 商业化后的发电成本可与煤电相比。

三、光伏电池用晶硅材料

目前全世界光伏工业晶体硅光伏电池所用的晶锭的投炉料, 都采用半导体工业的次品硅

及其单晶硅的头尾料，其总量约占半导体工业生产硅料的 1/10，为 1000 ~ 1200t/年。这种硅料的纯度大部分仍在 6 ~ 7N，价格依其品位约在 10 ~ 20 美元/kg。目前半导体工业用的投炉多晶硅料是采用三氯氢硅精馏法（西门子法）生产的，采用改进的西门子法并扩大规模进行生产是未来降低成本的有效措施之一。

1. 单晶硅材料

单晶硅材料制造要经过如下过程：石英砂 → 冶金级硅 $\xrightarrow{\text{提纯和精炼}}$ 多晶硅锭 $\xrightarrow{\text{沉积}}$ 单晶硅 $\xrightarrow{\text{切割}}$ 硅片。

硅主要以 SiO_2 形式存在于石英和砂子中。它的制备主要是在电弧炉中用碳还原石英砂而成。该过程能量消耗很高，约为 $14\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ ，因此硅的生产通常在水电过剩的地方（挪威、加拿大等地）进行。这样被还原出来的硅的纯度约 98% ~ 99%，称为冶金级硅（MG-Si）。大部分冶金级硅用于制铁和制铝工业。目前全世界冶金级硅的产量约为 50 万 t/年。半导体工业用硅占硅总量的很小一部分，而且必须进行高度提纯。电子级硅的杂质含量 $10^{-10}\%$ 以下。

典型的半导体级硅的制备过程如下：粉碎的冶金级硅在硫化床反应器中与 HCl 气体混合并反应生成三氯氢硅（ SiHCl_3 ）和氢气，化学反应式为 $\text{Si} + 3\text{HCl} \rightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$ 。由于 SiHCl_3 在 30°C 以下是液体，因此很容易与氢气分离。接着，通过精馏使 SiHCl_3 与其他氯化物分离，经过精馏的 SiHCl_3 ，其杂质水平可低于 $10^{-10}\%$ 的电子级硅要求。提纯后的 SiHCl_3 通过 CVD 原理制备出多晶硅锭。

基于同样原理可开发出另一种提纯方法，即在硫化床反应器中，用硅烷在很小的硅球表面上原位沉积出硅，此法沉积出的硅粉末颗粒只有十分之几毫米，可用做直拉单晶的投炉料或直接制造硅带。

拉制单晶有直拉法（坩埚拉制）和区熔法两种。直拉法（CZ 法）因使用石英坩埚而不可避免地引入一定量的氧，对大多数半导体器件来说影响不大，但对于高效光伏电池，氧沉淀物是复合中心，会降低材料少子寿命。区熔法可以获得高纯无缺陷单晶。常规采用内圆切割（ID）法将硅锭切成硅片，该过程有 50% 的硅材料损耗，成本昂贵。现在已经开发出多线切割法，可以切出很薄（ $200 \sim 100\mu\text{m}$ ）的硅片，切割损失减小 30%，硅片表面切割损伤轻，有利于提高电池效率，降低切割成本。

2. 多晶硅材料

由于硅材料成本占光伏电池成本中的绝大部分，因此降低硅材料成本是光伏应用的关键。浇铸多晶硅技术是降低成本的重要途径之一，该技术省去了昂贵的单晶拉制过程，也能用较低纯度的硅作投炉料，材料及电能消耗方面都较节省。

（1）铸锭工艺 铸锭工艺主要有定向凝固法和浇铸法两种。定向凝固法是将硅料放在坩埚中加以熔融，然后将坩埚从热场中逐渐下降或从坩埚底部通上冷源以造成一定的温度梯度，使固液界面从坩埚底部向上移动而形成晶锭。定向凝固法中有一种称为热交换法（HEM），在坩埚底部通入气体冷源来形成温度梯度。浇铸法是将熔化后的硅液从坩埚中倒入另一模具中凝固以形成晶锭，铸出硅锭呈方形，切成的硅片一般尺寸为 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ ，平均晶粒尺寸从毫米级到厘米级。

铸锭法中需要解决的主要问题是：

1) 盛硅容器的材质。因为硅熔体冷凝时会牢固地粘附在坩埚的内壁,若两者的膨胀系数不同,硅固化时体积增加9%,会使硅锭产生裂纹或破碎。此外,熔化硅几乎能与所有材料起化学反应,因而坩埚对硅料的污染必须控制在太阳级硅所允许的限度以内。

2) 晶体结构。用调整热场等方法控制晶体结构,以生长出大小适当(数毫米)的具有单向性的晶粒,并尽量减少晶体中的缺陷,这样才有可能制成效率较高的电池。

近年来,铸锭工艺主要朝大锭的方向发展。技术先进的公司生产的铸锭多在 $55\text{cm} \times 55\text{cm}$ (锭重150kg)左右,目前 $65\text{cm} \times 65\text{cm}$ (锭重230kg)的方形硅锭也已被铸出,铸锭时间在30~43h范围内,切片前硅材料的实收率可达到83.8%。大型铸锭炉多采用中频加热,以适应大形硅锭及工业化规模。与此同时,硅锭质量也得到明显的改进,经过工艺优化和坩埚材质改进,使缺陷及杂质、氧、碳含量减少。在晶体生长中固液界面的形状会影响晶粒结构的均匀性与材料的电性能,一般而言,水平形状的固液界面较好。由于硅锭整体质量的提高,使硅锭的可利用率得到明显提高。

由于铸锭中采用低成本的坩埚及脱模涂料,对硅锭的材质仍会造成影响。近年来,电磁法(EMC)被用来进行铸锭试验,方法是投炉硅料从上部连续加到熔融硅处,而熔融硅与无底的冷坩埚通过电磁力保持接触,同时固化的硅被连续地向下拉。冷坩埚用水冷的铜坩埚来形成。目前该工艺已铸出截面积为 $220\text{mm} \times 220\text{mm}$ 的长硅锭,铸锭的材质纯度比常规硅锭高。生产性的铸锭炉已铸造出500kg的硅锭,锭的截面积为 $350\text{mm} \times 350\text{mm}$,2.2m长,固化率为 $1\text{mm}/\text{min}$ 。固化及冷却时所产生的热应力是影响硅锭质量的主要参数,应不断优化和改进。该法能否正式进入工业化生产仍在实验评估中。

我国在20世纪80年代初就开始了多晶硅材料和光伏电池研究,进行铸锭材料研究的有北京有色金属研究总院、上海有色金属研究所和复旦大学等;其中上海有色金属研究所采用的是浇铸法,北京有色金属研究总院及复旦大学采用的是定向凝固法,并铸出了15kg、 $220\text{mm} \times 220\text{mm} \times 140\text{mm}$ 的硅锭。国家“九五”计划安排了100kg级硅锭的引进消化任务。

(2) 多晶硅结构及材料性能 采用计算机图像仪可对硅片缺陷及少子寿命等参数进行面扫描,这对观察多晶硅材料性能、结构及进行系统分析具有很大帮助。针对特有的铸锭工艺来分析氧、碳含量及其对电性能的影响是提高硅片质量的重要手段。在扫描电镜上加电子束感应电流(Electron Beam Induced Current, EBIC法)功能部件对样品进行扫描,对了解晶体硅电池因缺陷、晶界、杂质的局部影响十分有效。

(3) 硅片加工技术 常规的硅片切割采用内圆切割机,其刀损为 $0.3 \sim 0.35\text{mm}$,使晶体硅切割损失较大,且大硅片不易切得很薄。近几年,多线切割机的使用对晶体硅片的成本下降具有明显作用。 22mm 硅片可切薄到 0.2mm ,且切割的损伤小,可减少腐蚀的深度,一般可减少 $1/4$ 硅材料的损失。目前先进的大公司基本上都采用该设备。一台设备可切割 $2 \sim 4\text{MW}/\text{年}$ 的硅片。近期研究出可将85%的碳化硅磨料及油液经过离心机分离后重复使用工艺,可进一步降低材料消耗。

(4) 带状多晶硅制造技术 为了减少切片损失,在过去几十年里开发过很多种制造片状硅或带状硅的技术。在20世纪80年代,国际上曾出现过很多种生长硅带的方法,但大部分都处于实验室阶段,其原因是:第一,在高温过程中通过设备引入了过多杂质,达不到要求的纯度;第二,在再结晶过程中要求的高冷却速率会使晶体中产生过多的缺陷。

在生长速度与硅带质量之间寻找平衡,其降低成本的技术难度比晶锭硅高。下面介绍几

种比较成熟的带硅技术。

1) 限边喂膜 (Edge Defined Film Growth) 带硅技术。该技术的工艺过程如下: 采用适当的石墨模具从熔硅中直接拉出正八角硅筒, 正八角的边长比 10cm 略长, 总管径约 30cm, 管壁厚度 (硅片厚) 与石墨模具毛细形状、拉制温度和速度有关, 约 200 ~ 400 μm , 管长约 5m。采用激光切割法将硅管切成 10cm \times 10cm 方形硅片。电池工艺中采用针头注入法制备电池栅线, 其他工艺与常规电池工艺相同。电池效率为 13% ~ 15%。该技术目前属于 ASE 公司所有, 商品化生产规模是 4MW/年, 正计划扩产。

2) 枝蔓蹼状带硅技术。在生长硅带时两条枝蔓晶直接从坩埚熔硅中长出, 由于表面张力的作用, 两条枝晶的中间会同时长出一层如蹼状的薄片, 所以称为蹼状晶。切去两边的枝晶, 用中间的片状晶制作光伏电池。蹼状晶在各种硅带中质量最好, 但其生长速度相对较慢。

我国在 20 世纪 70 年代初就拉制出无位错的蹼状晶。在 20 世纪 80 年代中期北京有色金属研究总院在国家自然科学基金支持下开展了用碳网作支持物, 从横向拉制硅带的工作, 并研制出了设备 (研究工作在 20 世纪 80 年代末中止)。我国西北工业大学进行了滴硅旋转法, 即用电磁法熔化硅、然后将硅液滴到旋转模具上以形成硅片的探索性研究, 并达到了一定的水平。

3) Delaware 大学多晶片状硅制造技术。该技术基于液相外延工艺, 衬底为廉价陶瓷。陶瓷衬底可以重复使用。在电池制作中采用了 Al 和 POCl_3 , 吸杂和低温 PECVD- Si_3N_4 , 钝化技术, 钝化技术提供了体钝化和发射区钝化。1 cm^2 电池效率达到 15.6%。Delaware 大学和 Austropower 公司合作通过了中试产业化技术。

4) 小硅球光伏电池。硅球的平均直径为 12mm, 约有 2 万个小球镶在 100 cm^2 的铝箔上以形成光伏电池, 每个小球具有 PN 结, 这么多的小球在铝箔上形成并联的结构, 100 cm^2 面积的电池效率可达到 10%。原则上可使用冶金级的小硅球, 小硅球本身也容易进行提纯。该方法在技术上具有一定的特色, 但要降低成本在技术上仍有许多困难。该方法在 20 世纪 90 年代初发展起来, 但近几年其研究与发展陷于停顿状态。我国复旦大学也曾对这种光伏电池工艺进行了探索性实验, 掌握了基本技术的要点。