

小特集 次世代シリコン太陽電池製造のためのプラズマ技術

4. 結晶シリコン太陽電池におけるセル製造ラインの改革

上野 剛志

株式会社ファシリテイ

(原稿受付：2009年11月9日)

結晶シリコン太陽電池の低コスト化で重要なセルの高効率化と薄型化に対応した製造プロセスを概説する。また、関連してその高効率化に不可欠な SiN 膜と SiO 膜の形成に用いられるプラズマ CVD (Chemical Vapor Deposition) にも言及する。

Keywords:

crystalline silicon solar cell, photovoltaic cell production line, plasma enhanced chemical vapor deposition, silicon nitride, anti-reflection coating, hydrogen passivation

4.1 はじめに

結晶シリコン太陽電池の高効率化、薄型化に伴い、より高度なセル構造や量産プロセスが必要となっている。特に、今後の太陽電池の普及においては製造コストの低減が不可欠であるが、基板コストが太陽電池全体の製造コストに占める割合が大きい結晶シリコン太陽電池では、基板コストを低減させるために、基板の厚さを更に薄型化する必要があるが、それにより、製造工程では割れや反りの問題が生じ、基板のハンドリング技術が必要不可欠となっている。本章では、結晶シリコン太陽電池の基板となるシリコンウェハの薄型化に対応した独 SCHMID 社の結晶シリコン太陽電池のターンキーラインを紹介し、それに基づき、セルの製造ラインの概要と、その中のプラズマ CVD の役割と現状・課題について述べる。

4.2 SCHMID 社のターンキーライン

ターンキーとは、キーを回せば太陽電池セルの一貫製造ができるラインをいう。SCHMID 社は、太陽電池向けターンキーの先駆けメーカーであり、ウェハ製造用、セル製造用(図1)、モジュール製造用(図2)のそれぞれにターンキーを擁している。中でも SCHMID 社が最も力を注いでいるのがセル製造用のターンキーであり、その特徴はウェハ基板を一貫して水平自動搬送するインライン方式のターンキー・ソリューションで、世界で唯一の水平自動搬送ターンキーメーカーである。シュミッド社のセル製造ラインは、ローディングでウェハを枚葉ごとに自動乗載し、ラインの最終工程であるセルテスター(特性検査)まで一貫した、全自動水平搬送のため、ライン作業による工程間のウェハの移動や、キャリアあるいはボート移載時で発生するウェハのチップング・割れ等の破損がなく、歩留りの改善による生産性向上が図れると同時に、薄型化への対応が

可能である。

SCHMID 社のインライン化コンセプト

- ① 完全連結、一貫生産ラインの自動化
- ② 水平搬送によるインライン化
- ③ 薄型ウェハ対応
- ④ 統合型プロセスコントロールと品質管理
- ⑤ 水、薬液、エア消費量の最小化
- ⑥ 最新プロセス技術のインテグレーション
- ⑦ カスタムターンキープロセスの柔軟な対応
- ⑧ 高生産性と高効率化

4.3 インライン方式とバッチ方式

現在、セル製造ラインではバッチ方式が広く採用されている(図3参照)。バッチ方式とは、セル製造ラインの工程ごとにウェハをまとめて投入する処理のことである。各工程については後に述べるが、エッチング工程や拡散工程では典型的なバッチ処理であり、これがセル製造ラインの自動化を遅らせている要因の一つに挙げられる。また、従来のバッチ方式では、ウェハ基板の薄型化の移行に伴い、各工程間で行っているウェハキャリアあるいはボート移載時のウェハの破損や、垂直にセットされる熱処理中のウェハのストレスや反りの問題を完全に回避することは困難である。しかしながら、SCHMID 社のインライン方式は、ウェハ基板を一貫して、水平自動搬送・水平処理するため、ウェハの薄型化への対応が可能で、また、工程間のウェハ移載に伴う時間のロスと、製造工程の無人化によるヒューマンエラーが解消できる。

4.4 SCHMID 社のセル製造工程

SCHMID 社のスタンダード・セルターンキーラインは、ローディング、ソー・ダメージ除去/テクスチャリン

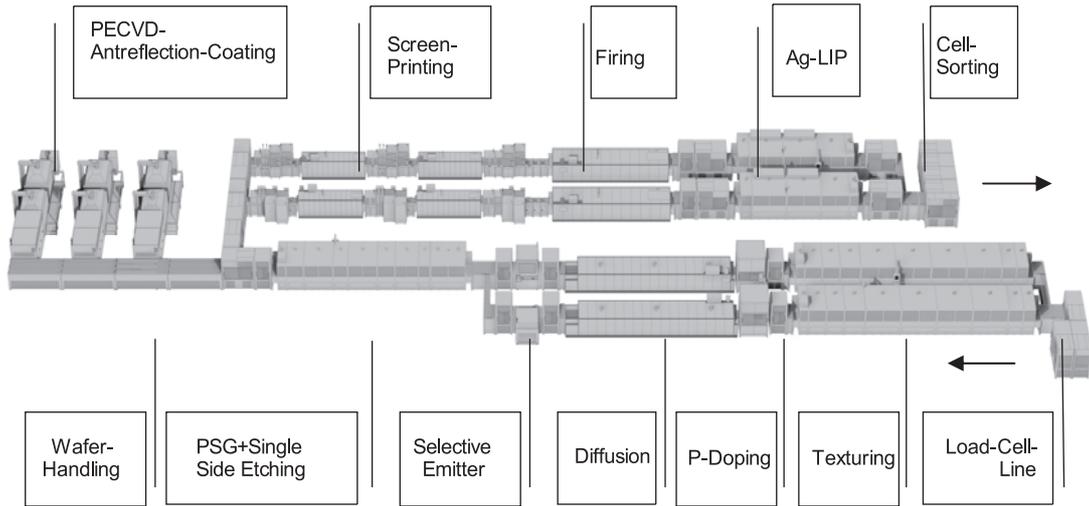


図1 SCHMID社の最新インライン方式ターンキーセル製造ライン（生産能力3300枚/h）。

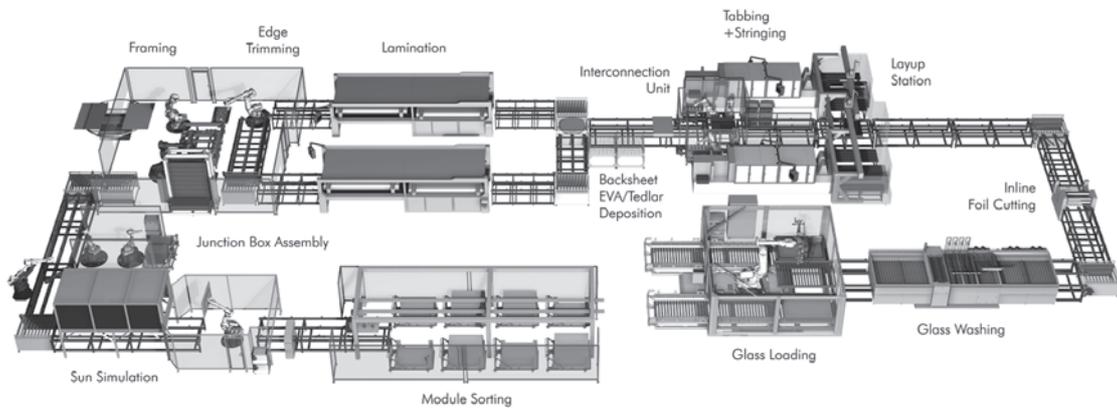


図2 SCHMID社のターンキーモジュール製造ライン（生産能力 30-50 MW）。

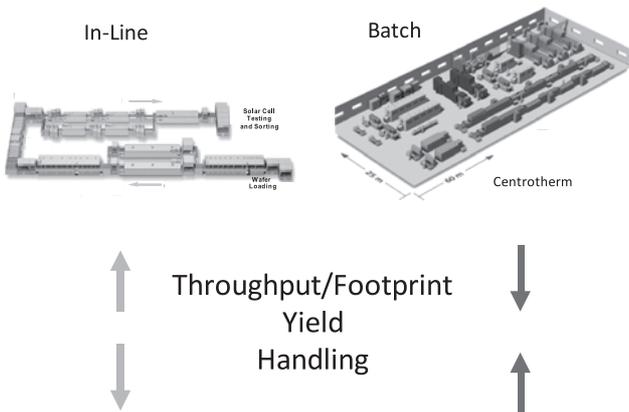


図3 インライン方式とバッチ方式の比較（セル製造ライン）。

グ、リンドーピング、拡散、接合分離/PSG除去、プラズマCVD（反射防止膜形成）、スクリーン印刷/光めっき（裏面電極/表面電極形成）、セルテスター（特性検査）から構成されている。下記に、その各プロセスについて説明する。

- ① ソー・ダメージ除去/テクスチャリング
アルカリ性溶液（選択性）と酸性溶液（等方性）によるエッチング工程で、ウェハスライス時のウェハ表面の

ワイヤーソー・ダメージを除去することと、光反射を低減させるウェハ表面のテクスチャリング形成を目的とする。

- ② リンドーピング、拡散
ウェハ基板にリンの拡散剤を塗布する工程と、熱処理による固相拡散工程で、基板中へのエミッタ拡散を行い、pn接合形成を目的とする。
- ③ 接合分離/PSG除去
酸性溶液によるウェハ端部および裏面エッチングと、表面のエッチング工程で、ウェハ端部および裏面に形成されたP拡散層の除去と、拡散工程で形成された表面のリンケイ酸ガラス（PSG）層の除去を目的としている。
- ④ プラズマCVD（反射防止膜形成）
化学気相成長法（CVD）によるSiN膜を堆積する工程で、主に、反射率を低減する反射防止膜の形成を目的とする。プラズマCVDについては、後に詳しく述べることにする。
- ⑤ スクリーン印刷/光めっき（裏面電極/表面電極形成）
セル受光面にはスクリーン印刷法によるAgペーストと光めっき法（次項で説明）によるAgめっきを施し、セル裏面には、スクリーン印刷法によるAlペーストとAg

ペーストを印刷する工程で、同時に加熱処理する焼成工程が含まれ、表裏面の電極形成を目的としている。

⑥ セルテスター（特性検査）

セル製造の最終工程ではセルの電気的特性や外観の検査が行われ、変換効率等の分類から、不合格品の分類までされる。

4.5 SCHMID 社の高効率セル製造ライン

前述したように、SCHMID 社のターンキーラインは固相拡散や酸性溶液による接合分離等の独特のプロセスが採用されているが、中でも特徴ある独自技術が、光めっき（特許）技術（Light Induced Plating, LIP）である（図 4）。これは LED 光を照射することで電子が発生し励起させることで電極を形成するめっき技術であり、スクリーン印刷法に比べ電極の低抵抗化が図れ高効率化に不可欠な技術である。このほかにも SCHMID 社は、セレクトティブエミッターや、裏面パッシベーションといった最新プロセスを開発しており、それらの最新技術を取り入れたターンキーが SHEse シリーズで、高効率セル製造用ターンキーとして新たにラインナップしている。また、独自の製造プロセスを構築しているセルメーカーを対象に、「カスタマイズド・ターンキー・プロセス（CTP）」という新たなソリューションも提供している。CTP とは、ターンキーをより柔軟に考え、太陽電池メーカーのニーズに応じて顧客の独自のプロセスと SCHMID 社のターンキー技術を融合させて、顧客独自の高効率化製造ラインを実現する。

4.6 結晶シリコン太陽電池セル製造ラインにおけるプラズマ CVD の役割

結晶シリコン太陽電池のセル製造ラインではプラズマ処理装置が使われている。プラズマ処理装置は、半導体工業、化学工業、その他の分野でも広く利用されるが、太陽電池の製造においても利用されており、結晶シリコンの太陽電池では、反射防止膜の形成工程で使用され、また基板表面および基板端部のエッチング工程で使用されることもある。薄膜シリコンの太陽電池の製造ではプラズマ技術は欠かせないものとなっている。太陽電池の製造でプラズマを用いる表面処理や、薄膜形成、エッチング加工においては処理時間の短縮や、大面積による一括処理が求められる。その薄膜形成では、プラズマ処理装置内でプラズマを生成し、CVD（Chemical Vapor Deposition）法によって基板上に各種の薄膜を形成する。例えば、結晶シリコンの太陽電池セルでは、シリコン基板上に反射防止膜として SiN 膜

（または SixNy 膜）を形成する。また SiO 膜（または SixOy 膜）や、TiO₂ 膜を形成することもある。SiN 膜や SiO 膜はパッシベーション膜としての機能も有している。

結晶シリコン太陽電池の高効率化では、基板に入射した光を反射させないことと、光生成キャリアを再結合させないことが重要である。特に、多結晶シリコンは基板に結晶欠陥が多く存在し、結晶粒界に H を結合させて結晶粒界不活性化させる必要がある。そのため、プラズマ CVD 法により、SiNx:H をウェハ基板上に成膜し、反射防止膜と表面およびバルクのパッシベーションを施す。

一般的に、結晶シリコンの基板上に反射防止膜およびパッシベーション膜として SiN 層を形成する場合、SiH₄-NH₃ 系ガスが用いられ、その屈折率は約 2.2 で膜厚は約 80 nm 前後でそれぞれ管理される。（成膜後の H 量を管理することもある）。プラズマ処理中のガス圧力は 2~50 Pa に維持される。このとき、処理基板の温度は 350~450℃ に加熱することによって緻密な SiN 膜が形成される。

今後の太陽電池の普及には、より一層の高効率化と製造コストの低減が求められるが、セルの低コスト化では各種薄膜の成膜速度の高速性と、大面積化および膜厚の均一性が要求される。従来、SiN 膜や SiO 膜の成膜装置としては平行平板型の RF プラズマ処理装置が多く用いられてきた。しかしながら、この平行平板型のプラズマ処理装置では成膜速度の高速性に限界がある。そのため、電子密度が高く、大容積のプラズマが均一に生成できるプラズマ処理装置が求められている。それを解決するひとつとして、マイクロ波の表面波を利用したプラズマ処理装置、すなわち表面波励起プラズマ処理装置がある。しかしながら、表面波プラズマは表面波が電子密度に依存するため、均一な SiN 膜や SiO 膜の形成が容易ではない。そのため、均一な電子密度のプラズマが安定的に生成できる表面波励起プラズマ処理装置が求められる。

現在、結晶シリコン太陽電池の商業生産では、高速成膜を可能にした DC プラズマ CVD 装置がある。これは、プラズマ源がウェハ基板をスキャンする方式で、基板の移動と共に基板温度が変化する。そのため、生成される膜厚と膜質の制御がきわめて難しい。また、この DC プラズマ CVD 装置は、プラズマ発生源のプラズマ発生領域が狭く、頻繁にクリーニングが必要である。

製造コストの低減化では、装置のダウンタイムを短縮して、生産性を向上していくことが重要である。結晶シリコン太陽電池の製造ラインに使用されるプラズマ CVD 装置はターンキー全体の価格の中で非常に大きな割合を占める

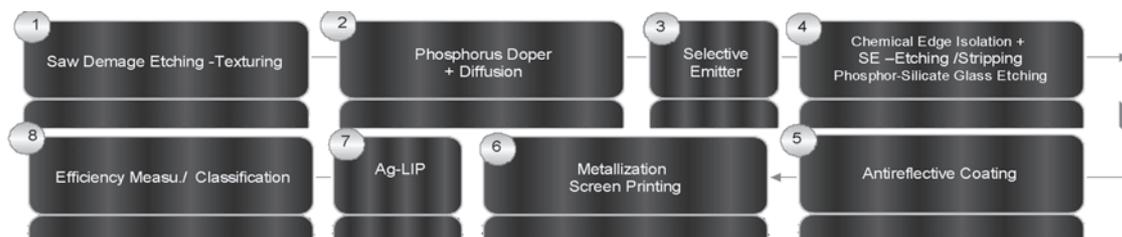


図 4 SCHMID 社の結晶シリコン太陽電池高効率セル製造フロー図（セレクトティブエミッター仕様）。

表1 (a)基板静止式. 並行平板型の低周波ダイレクトプラズマで, 大面積化が容易である. また, 高周波プラズマに比べ, 膜中への水素イオンが増大するが, 成膜速度が遅い. (b)基板スキャン式. マイクロ波は低周波と比べ, 低い電子温度でかつ電子密度が高く, 高密度プラズマが得られるため高速成膜が可能だが, 実際の生産ラインでは, 高周波プラズマとプロセス制御が難しく, 膜質安定化および膜厚均一化が容易でない. (c)基板スキャン式. 熱プラズマで, 基板の移動と共に基板温度が変化するため膜厚が安定しない. また, プラズマ発生源のプラズマ発生領域が狭く, 頻繁にメンテナンスを行う必要がある. (d)基板静止式. 高周波と比べ成膜速度が遅い. ウェハを特殊なカセット(グラフィートボード)にセットする装置形態のため, 製造ラインの自動化が複雑になり, ウェハの薄型化への対応も難しい.

装置メーカー	(a)	(b)	(c)	(d)
型式	-	-	-	-
成膜室数	1	1	1	4
成膜方式	PECVD	PECVD	PECVD	PECVD
プラズマ方式	ダイレクト	リモート	リモート	ダイレクト
周波数	250 KHz	2,450 MHz	DC	40 KHz
基板温度	500°C (最大)	250-450°C	20-450°C	100-500°C
デポレート・レンジ	0.52 nm/s	0.67-1.67 nm/s	4-20 nm/s	0.1-0.3 nm/s
成膜均一性 (基板内)	±4%	±3%	±2.5%	±4%
成膜均一性 (パッチ内)	±5%	±4%	±2.5%	±4%
成膜均一性 (パッチ間)	±7%	±4%	-	±4%
水素量 (SiN 層)	-	12-16%	10-20%	10-20%
装置形式	インライン (枚葉)	インライン (枚葉)	インライン (枚葉)	パッチ (カセット)
ウェハ枚数/キャリア	88枚	45枚	9枚	216枚
成膜時のウェハの向き	水平	水平	水平	垂直
最大スループット (156 mm wafer)	1147枚/h	3375枚/h	2160枚/h	1152枚/h
実用スループット (156 mm wafer)	1147枚/h	3000枚/h	2160枚/h	1050枚/h

が, 装置のダウンタイムも長い. そのダウンタイム増大を助長しているのがクリーニングであり, 定期的な周期でCVD装置内壁等に付着した堆積物のクリーニングを行う必要がある. シリコンLSI (Large Scale Integration) 製造で使用されるCVDは, 三フッ化窒素 (NF_3) や六フッ化エタン (C_2F_6) 等のガスを用いたセルフクリーニングが一般的である. 結晶シリコン太陽電池製造向けのCVDにおいても, 同様なセルフクリーニング機能を持たせて, 定期洗浄を極力必要としない工夫を施し, ダウンタイムとそれによる生産性損失を最小限に抑えいくことがきわめて重要になる.

表1に各社のプラズマ処理装置の仕様と特徴を示す. なお, 表1および記載内容は, 筆者が独自の手法で調査した比較一覧であり, あくまでも筆者の立場からリサーチした一例であり, この表で各社の性能等を断言することはできないという点を考慮しておく必要がある.

4.7 まとめ

今後の太陽電池の普及には, 高効率化と製造コストの低減が不可欠である. 結晶シリコン太陽電池のコスト低減に

向かっては, ウェハの薄型化が欠かせないが, その製造工程ではウェハの割れや反りが大きな問題となってくる. その問題解決にきわめて有効なのが, 一貫したウェハ基板の水平搬送と水平処理の全自動化である. また, 高効率化では, 太陽電池の発電量を高めることがシステム単価を下げることになるが, 特に, 結晶シリコン太陽電池では, 高効率化がきわめて重要な取り組みとなる. そして, 結晶シリコン太陽電池の高効率化においては, 光の表面反射の低減, 表裏面のパッシベーション化, また, 多結晶ではバルクのパッシベーション化が不可欠で, これらに有効なSiN膜とSiO膜の形成に用いられるプラズマCVDには, プラズマの大面積化に加え, 更なる反射防止膜とパッシベーション膜の膜厚均一化と高堆積速度化の技術深化が期待される.