

レーザーコンタクトオープニング (LCO) + メッキによる TOPCon 太陽電池の持続可能なソリューション

太陽光発電業界は、さらに効率の高い太陽電池モジュールに対する需要の高まりを受けて、大きな技術的転換期を迎えています。その結果メーカーは、PERC (Passivated Emitter and Rear Contact: パッシベーション・エミッタ・リアコンタクト) 技術よりもさらに優れた性能を提供するセルアーキテクチャへと移行しつつあります。その中でも TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact: トンネル酸化膜パッシベーションコンタクト) は、今後 10 年間でそれ以降の結晶シリコン (c-Si) 太陽電池製造を占有する技術の最有力候補として浮上しています。最近の各種予測によると、TOPCon は最終的に、最大 60% のシェアを獲得すると予想されています (ITRPV - International Technology Roadmap of Photovoltaics)。

TOPCon は、キャリア収集能力に優れており、エネルギー損失が低く、全体的な効率が高いなど、PERC よりも顕著に高い性能を実現する一方で、特にメタライゼーションの面で新たな課題ももたらします。従来のスクリーン印刷用の銀は、太陽電池の表面と裏面の接点を形成するための業界標準の材料として、長年にわたって使用されていますが、その持続可能性はますます低下しつつあります。銀は既に太陽電池の中で (シリコンに次いで) 2 番目にコストの高い部品である上に、TOPCon は PERC よりも銀の使用量が 50% も多いためです。

このように銀の使用量が多いことから、長期的な材料の入手可能性と TOPCon の経済的な実行可能性をめぐる懸念が生じています。これによってコストが増加するだけでなく、グローバルな銀のサプライチェーンにさらなる負荷がかかって、価格変動が引き起こされる可能性があります。明らかに、代替案が必要です。

ここで魅力的な解決策として登場するのが、レーザー・コンタクト・オープニングと電気化学メッキを組み合わせた (「LCO + メッキ」と呼ばれる) 方法です。この方法では、高価な銀ペーストを使用する代わりに、短波長の超短パルス (USP) レーザーを使用してセルの表面と裏面の薄い誘電体層に非常に精密な開口部を形成します。続いて、シリコンが露出したそれらの領域に銅メッキを施すことにより、高品質で低抵抗の抵抗接点が形成されます。当然ながら、銅を使用する方が材料コストは低く、導電率は高くなり、拡張性も高くなります。

本稿では、MKS Inc のレーザーとメッキ技術が、LCO + メッキへの移行をどのようにサポートするかについて解説します。

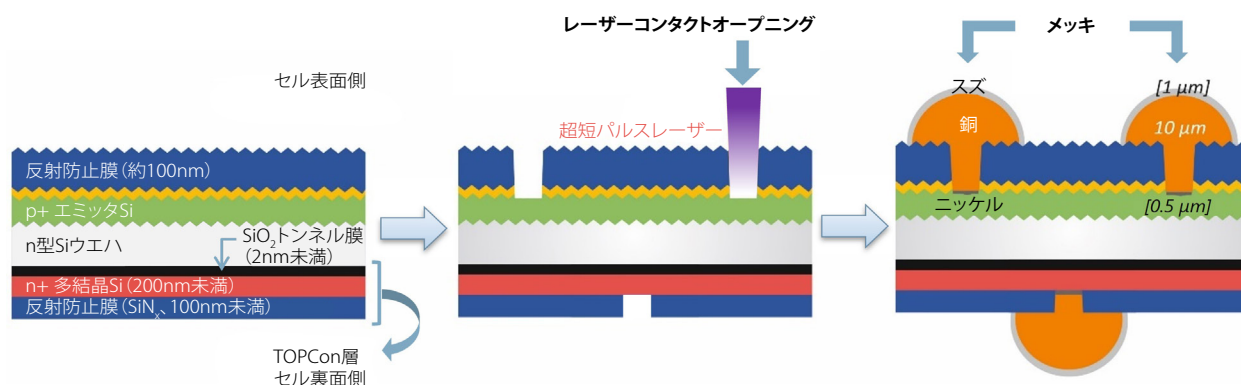


図 1. TOPCon 太陽電池の製造における「LCO+メッキ」メタライゼーション工程の流れ

LCO+メッキの優位性

スクリーン印刷は、シリコン太陽電池のメタライゼーションに対する標準的手法として長い間使用されてきましたが、特にTOPConの製造においては、その限界がますます明白になりつつあります。特に、銀ペーストは高価というだけでなく、どれだけ精密に印刷できるかという点で本質的な限界があります。コンタクトラインの幅が広く、高さが高くなるほど、光の陰影が多くなり、セルの活性面積が減少して、抵抗損失が高くなります。これらすべてがセル効率の低下につながります。また、スクリーン印刷には、機械的接触／圧力や高温炉での焼成など、やや過酷な物理的処理が伴い、それによって薄いウエハや繊細なTOPCon薄膜が損傷する恐れがあります。このような処理は程度の差こそあれ、生産の歩留まり／スループットを低下させます。

LCO+メッキは、そうした限界を直接的に解消します。レーザーを使用して、パッシベーション誘電体層の正確に定義された領域を開くことで、メーカーは、低抵抗の接点を選択的に形成することができます。続いてその領域を、比較的少ない量で費用対効果の高い金属（ニッケル、銅、スズ）でメタライズすることで、性能を損なうことなく材料コストを大幅に削減することができます。

このようにLCO+メッキは、より狭いメタルライン、より高い導電率、より低い接点抵抗を実現する、より持続可能性の高いメタライゼーション方法です。装置やプロセス制御の複雑さは増しますが、独フライベルクのフラウンホーファー研究機構・太陽エネルギーシステム研究所（Fraunhofer Institute for Solar Energy: ISE）などの組織によって検証された、パイロットラインによる初期結果では、従来のスクリーン印刷によるセルと同等か、それを上回る性能が得られることが示されています。したがって、TOPConの採用が加速する中で、LCO+メッキは、高効率でコスト重視の太陽電池製造の新たな標準となる準備が整った状態にあります。

LCOプロセスの考察事項

LCOの目的は、原理的にはシンプルで、下層のシリコン層やSiO₂層への影響を最小限に抑えながら、反射防止層とパッシベーション誘電体層を除去することです。しかし、これを実際に行うには、厳密に制御された高精度なプロセスが必要です。

短波長の超短パルスレーザー、具体的には、紫外（UV）のピコ秒（ps）レーザーやフェムト秒（fs）レーザーは、このニーズを満たすのに最適です。短いパルス幅にUV光の強い吸収を組み合わせることが重要です。窒化シリコン（SiN_x）の反射防止膜は、UVレーザー光の大半を透過させるため、その下のシリコン層における（熱と光の両方の）相互作用を、数十nmの範囲に抑える必要があります。この浅い領域に閉じ込められた吸収エネルギーにより、下のシリコン層にプラズマが形成されて急速に加熱されることで、薄いSiN_x層が除去されます。このように、エネルギーの拡散を制御して限定することが、下層のトンネル酸化膜と多結晶シリコン（多結晶Si）層の完全性を維持するために不可欠であり、その完全性がTOPConセルの性能を左右することになります。図2は、ピコ秒（ps）とフェムト秒（fs）のUVレーザーで形成したLCOの形状を、光学顕微鏡で観察した様子を示しています。

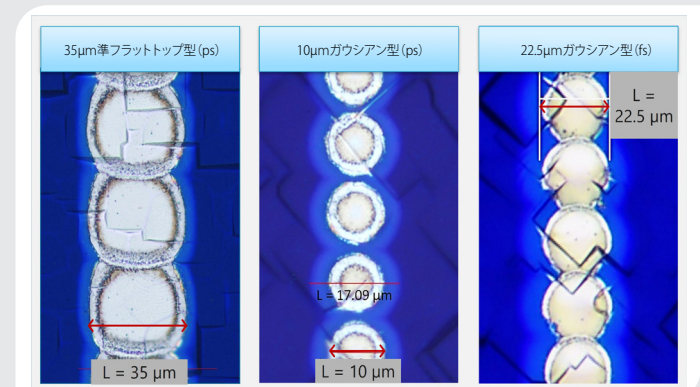


図 2. ps/fsレーザーパルスで加工したLCO形状の例（ガウシアン型と準フラットトップ型の強度分布を使用）。

パルス幅、波長、スポット径、フルーエンスなどのレーザーパラメータを、プロセスのスループットとのバランスを図って慎重に最適化する必要があります。ほとんどのプロセスにおいて、psレーザーは速度と品質を優れたバランスで提供します。しかし、TOPConのLCOのような薄膜の処理に対しては、fsレーザーの方がアブレーション閾値が低く、積層材料に穏やかに作用するため、スループットが高くなる場合があります。準フラットトップ型の強度分布を適用するなどのビーム整形により、アブレーションの深さと均一性を、さらにきめ細かく制御することができます。

MKS Incのアプリケーションエンジニアは、TOPCon太陽電池材料のアブレーション中に、さまざまなレーザープロセスパラメータがどのように作用するかを具体的に特性評価するために、詳細な調査を行いました。この作業の目的は、以下の処理を確実に達成するパラメータの組み合わせを特定することでした。

- SiN_x 反射防止層(厚さは70~120nm)を完全に除去する
- ターゲット層全体にわたって均一にアブレーションを行う
- 周辺材料に対する熱影響を制御して最小限に抑える
- 下層の多結晶Si層(200nm未満)に対する影響を最小限に抑える
- 多結晶Si層の下に薄い SiO_2 トンネル/パッシベーション層(厚さは1~2nm)に損傷を与えない

図3は、MKS Incで行われた試験の1つの結果です。走査透過電子顕微鏡(STEM)を使用して、TOPCon太陽電池がレーザーにどのように反応するかが詳細に示されています。この画像では、わずかに重なり合う3発のpsレーザーパルスによって対象領域のアブレーションが行われています。同じ加工領域を上から見た画像と断面図の両方が示されています。

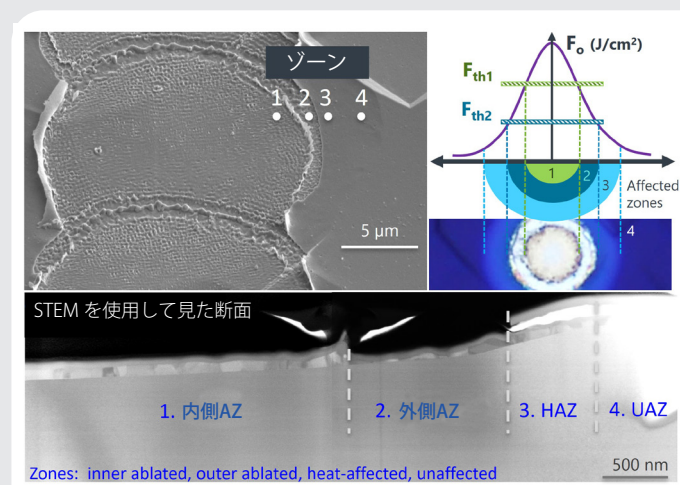


図 3.レーザー加工領域を、内側アブレーションゾーン(AZ)、外側アブレーションゾーン、熱影響ゾーン(HAZ)、非影響ゾーン(UAZ)の4つの異なる領域に分類することができます。各ゾーンの領域が図に示されています。

ここで注目すべき点は、レーザースポットは中心に近いほどエネルギー強度が高いにもかかわらず、外側AZ(図中でゾーン2と示されている溝部分)の方が内側AZ(図中でゾーン1と示されている領域)よりも多くの材料が除去されていることです。考えられる理由の1つは、レーザービーム周辺部の強度が、上層(SiN_x)の非線形吸収を引き起こすには不十分であることです。その結果、ビームのエッジ部分では、予想よりも多くのレーザーエネルギーがその層を透過して、より多くのシリコンが除去されます。超短パルスの照射で生じる急速な加熱と冷却により、ゾーン3が形成されます。このゾーンでは、p+多結晶Siの一部がアモルファスSiに変換されます。これを多結晶状態に戻すために、追加の加熱サイクルが必要になります。

メッキによるメタライゼーション

LCOによってTOPCon太陽電池にビアを形成した後、次の重要な工程は、金属の蒸着です。高効率で費用対効果の高いメタライゼーションを行うための最適な手段は、メッキです。高価な銀ペーストを使用するスクリーン印刷とは異なり、メッキでは、銅を主要導体として使用します。銅は導電率が高く、材料コストを大幅に削減することができます。

TOPConに対する銅を用いた標準的なメタライゼーション・スタックは、一般的に次の3つの工程で形成されます。

1. ニッケル(Ni)メッキ:抵抗接点を形成するとともに、銅とシリコンの間の拡散バリアとしての役割を果たします。
2. 銅(Cu)メッキ:メインの導電経路を作成します。
3. スズ(Sn)または銀(Ag)による封止:耐食性とはんだ付け性を強化します。

これらの工程は、電気化学堆積(ECD)または無電解メッキによって行うことができます。繊細なTOPCon構造に対しては、無電解ニッケルメッキが魅力的です。析出を引き起こすために電気を流す必要がなく、両面をメッキできる可能性があるためです。これによって、繊細なウエハに対する処理工程と機械的ストレスを減らすことができます。

しかし、無電解メッキは、プロセスが簡素化されてコストが削減できる可能性がある一方で、大量生産にはまだ広く採用されていません。これに対してECDは、より確立された手法であり、初期設備投資は高くなりますが、優れたプロセス制御が可能で、厚みの均一性と高い材料純度が可能になります。図4に示すように、集束イオンビーム(FIB)によってECDメッキの一部を除去し、メッキ界面を詳しく観察することができます。

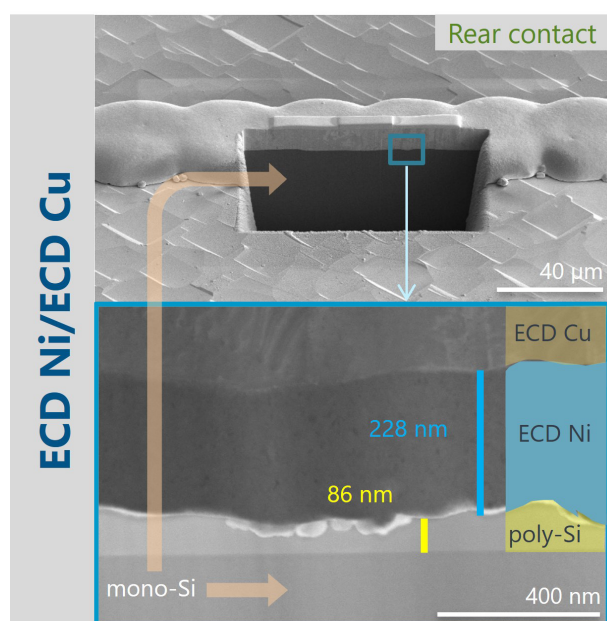


図 4. ECDメッキを施した断面を詳しく見ると、層の間が密着して連続的に接触していることがわかります。

どちらのメタライゼーション方法を選択する場合でも、プロセスの統合が鍵となります。低い接点抵抗と高い密着強度が確実に得られるように、レーザー加工による開口部を、メッキプロセスの要件に合わせて慎重に最適化する必要があります。注意すべき点としては、LCOの開口部のサイズ、スポットのオーバーラップ率、残留表面の品質などがあり、そのすべてが、メッキの均一性、密着性、性能に影響を与えます。

セル性能

最適化されたLCO+メッキの生産プロセスにより、現実的にどのような効果が期待できるでしょうか。これを調べるために、Spectra-PhysicsのレーザーシステムとAtotechのメッキ化学物質を使用して、TOPConデバイスを作成しました。この調査は、フラウンホーファーISEと共同で行われたものです。ただし、この調査で使用したウエハ前駆体

は、LCO用に最適化されたものではなく、メッキは、実験室グレードの装置で行われていることに注意してください。

この条件下で、最大23.3%のセル効率が得られました。開放電圧(VOC)は約693 mV、曲線因子(fill factor)は82%以上でした。使用したウエハは、実際にはスクリーン印刷用に設計されたもので、そのスクリーン印刷によるメタライゼーションの結果(24%)とほぼ同等の効率が得られたことになります。

ウエハ前駆体、レーザープロセス、化学物質を包括的に最適化して実施された、他のグループによる試験では、26.7%の効率が達成されています。これは、製造可能なTOPConセルとして実用的と考えられる上限に近い値です。

結論

TOPConは、今後10年間のシリコン太陽電池製造の主要技術として位置付けられていますが、長期的に成功するかどうかは、銀を使用するスクリーン印刷を超えることにかかっています。LCO+メッキは、拡張性と持続可能性に優れた代替手段です。特に、Spectra-PhysicsのレーザーとAtotechのメッキ化学物質の組み合わせは、高効率性能と製造可能性の両方を実現する、メタライズされたTOPConセルを作成できることが実証されています。このプロセスは、複数の高速加工ヘッドを並行して使用することにより、最大毎時3万5000枚のウエハを生産するレベルのスループットにまで拡張することができます。このことからLCO+メッキは、TOPCon太陽電池の商用生産に向けた実行可能な道筋であるといえます。

製品

IceFyre®産業用ピコ秒レーザー

IceFyre UV50は、市場で最も高性能なピコ秒UVレーザーで、1.25MHzで50Wを超えるUV出力(40 μ J以上)を提供し、バーストモードにおけるパルスエネルギーは数百 μ J、パルス幅は10psです。IceFyre UV50は、その高い出力とシングルショットから10MHzまでの繰返し周波数によって、新たな基準を打ち出す製品となっています。IceFyre UV30は、60 μ Jを超えるパルスエネルギー(バーストモードではそれ以上)で、30Wを超えるUV出力を提供し、シングルショットから3MHzの範囲で卓越した性能を示します。IceFyre IR50は、400kHzのシングルパルスで50Wを超えるIR出力を提供し、シングルショットから10MHzの範囲で優れた性能を示します。

IceFyreのレーザーには、ファイバレーザーの柔軟性とSpectra-Physics独自のパワーアンプ機能を活用して、業界で最も高い汎用性を備えたTimeShift™ psプログラマブルバーストモード技術を実現する、ユニークなデザインが採用されています。各レーザーには、標準の波形セットが用意されています。オプションのTimeShift ps GUIにより、カスタム波形の作成が可能です。このレーザーデザインにより、ポリゴンスキャナを使用している場合など、高速スキャン速度での高品質処理において、既存のピコ秒レーザーの中で最も低いタイミングジッターで、真のパルスオンデマンド(POD)および位置同期出力(PSO)のトリガーが可能です。

	IceFyre UV50	IceFyre UV30	IceFyre GR50	IceFyre IR50
波長	355 nm		532 nm	1064 nm
出力	>50 W @ 1250 kHz	>30 W (典型値) @ 500 kHz >25 W @ 800 kHz >20 W (典型値) @ 1 MHz	>50 W @ 500 kHz	>50 W @ 400 kHz
最大パルスエネルギー (典型値) (TimeShift ps により、バースト あたりのパルスエネルギーがさら に増加)	>40 μJ @ 1250 kHz	>60 μJ (典型値) @ 500 kHz >31 μJ @ 800 kHz >20 μJ (典型値) @ 1 MHz	>100 μJ @ 500 kHz	>200 μJ @ 200 kHz
繰返し周波数	シングルショット - 10MHz			
パルス幅 (FWHM)	<12 ps (10 ps 典型値)		<15 ps(13 ps 典型値)	
TimeShift ps	yes			
パルスエネルギー安定性	<2.0%, 1 σ			<1.5%, 1 σ
出力安定性	<1%, 1 σ, 8時間以上			

MKS Atotech

太陽電池のコンタクトフィンガーを電気メッキすることにより、材料コストを大幅に削減しつつ、セル効率を高めることができます。メッキによるNi / Cu / Sn接点は、従来のスクリーン印刷による接点よりも優れた性能を示します。

ニッケルメッキ: 薄いニッケルシード層がバリア層として機能し、シリコンとの抵抗接点を確立します。Nimate® PV (電解) やEXPT PV EN 4 (無電解) は、シード層や拡散バリアとして機能します。

銅メッキ: 優れた電気的特性を持つ高導電性の銅フィンガーを実現します。低応力で延性のあるその組成は、機械的衝撃に対する耐性も備えます。Cupracid® PVファミリーは、2~25 ASDの電流密度で動作するように調整されています。

スズメッキ: 信頼性の高いセル接続のためのはんだ付け性を確保し、湿度等の影響から銅を保護します。Stannacid® PVは標準的なスズプロセスで、Niveostan® PV 20は高速なスズプロセスです。

	Niメッキ		Cuメッキ		Snメッキ	
	EXPT PV EN 4	Nimate PV	Cupracid PV 70	Cupracid PV 5-2	Niveostan PV 20	Stannacid PV
用途	Pd触媒が不要な無電解Niプロセス	電解スルファミン酸ニッケルプロセス	中速電解銅プロセス	高速電解銅プロセス	高速スズプロセス	標準的な硫化物ベースのスズプロセス
特性	リン含有率が1~6%	Ni純度が高い	- 内部応力が低い - 高アスペクト比に対応		フルオロホウ酸塩と鉛フリーの電解液	非常に高いスローイング性を実現
メッキ速度	0.1 - 0.3 nm/min	0.5 - 5 ASD	5 - 10 ASD	10 - 50 ASD	5 - 40 ASD	1.2 - 3 ASD