超短パルスレーザを用いたオープンリール加工

クリスチャン・ショルツ

薄膜構造形成のための最高のスループットと最低の生産コスト

フレキシブル電子デバイスの高い歩留りと大量生産に対する要求はさらに増大し、高スループットと非常に低い生産コストを組み合わせた産業システムに対応した新しい生産プロセスを必要としている。

その一例として、3Dマイクロマック（3D-Micromac AG）が開発したオープンリール方式のレーザシステムは、これらの目標を満たすことができる。このシステムはレーザ光源とオープンリール装置を一体化し、フレキシブル基板が連続的に移動するオンザフライ加工を可能にしている。

フレキシブル基板上の薄膜レーザ加工は、電子デバイスのマーケットとフレキシブル太陽電池への応用を目的にして開発された。これらの目的に対して、超短パルスは固体材料と相互作用する時間が短いので（フォトニックシステムに誘起されるエネルギーが最小化され、アブレーションは非熱的過程に近づく）、熱に敏感な薄膜のアブレーションには理想的な手段になることが実証された。また、アブレーションされたプラズマとの相互作用が同時に起こることもない。これらのすべての事実によって、レーザ加工する境界の応力は最小になり、熱影響ゾーンの発生も最小になっている。

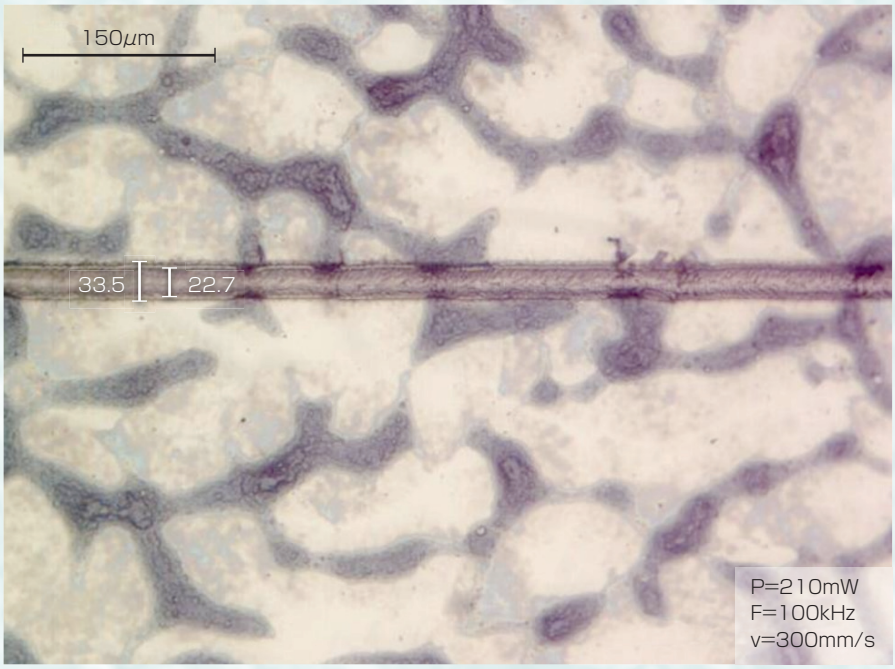


図1　PET基板上のPEDOT:PSSの構造形成（λ=266nm）

フレキシブル回路の構造形成

フレキシブル電子回路の量産を可能にするには、低価格プロセスによる製作が必要になる。プリント回路は化学蒸着や物理蒸着プロセスの場合よりも安価になる。しかし、残念なことに、今日の利用可能な印刷技術では対応が難しく、その実現には大きな努力を必要となる工程段階がある。例えば、両面プラスチック回路カードや薄膜システムを生産するための高品質相互接続の形成は、打ち抜き加工などの確立された技術でも実現できない。レーザによる直接書込み工程を組み合わせると、従来の方法では対応できなかった連続オープンリール方式による巻取りウェブの制約のない取扱いが可能になる。

印刷できる導電層材料は導電性高分子材料のPEDOT：PSSが代表例になる。この材料は330nmから1100nmまでの波長範囲において、広く使われているPET基板をわずかに上回る非常に低い吸光度が得られる。この性質は導電層のレーザアブレーションを基板への影響なしに抑えることができる。そこで、レーザ波長（266から1064nm）とパルス継続時間（12psから100ns）を変えて、PET基板上のPEDOT:PSSのアブレーションを試験した。まず、1064nmレーザの基本波（1064nmの近赤外線）と第二高調波（532nmの可視光）を使用して、レーザパルスの継続時間を12psから100nsの範囲で変更した。予想したように、最初の近赤外線と可視光の波長による試験では、

DEPOT：PSS層の除去を基板の大きな損傷の発生なしに行うことはできなかった。これらの実験にもとづいて、紫外線領域の波長（第三高調波の355nm）による試験を紙と箔の搬送基板上で行った。50nsのパルス継続時間をもつレーザ光源を用いると、DEPOT：PSS層は完全に除去されたが、PET箔には損傷（激しい膨らみ）が発生した。

超短レーザビームを適用することで、機能性高分子のアブレーションが箔の激しい膨らみなしに可能となった。薄膜高分子層を適切にアイソレーションできるレーザフルエンスを用いたときに、除去される基板材料は10μm以下の薄い厚みであった。このような基板材料のアブレーションは、各種の応用において問題ではなく、例えば、二つの導電領域のアイソレーションでは、それらの分離だけが必要になる。切断速度は切断の幾何学形状に強く依存する。28μmの幅を640kHzの繰返し速度で切断したときのレーザの限界速度は5m/sであった。切断速度の向上は繰返し速度の高いレーザ光源を使うことで実現できた。

266nm（1064nmレーザの第四高調波）の波長と約2μmまでのパルス継続時間を用いると、基板材料の溝深さはさらに減少した（**図1**）。このことは波長が330nm以下になると、PEDOT：PSSとPET基板の光吸収が顕著に増加し、レーザの侵入深さが減少する事実にもとづいている。この利点によって、レーザ光源はさらなるパワーの減少が可能になり、光路を大幅に増加したい要求にも対応できる。

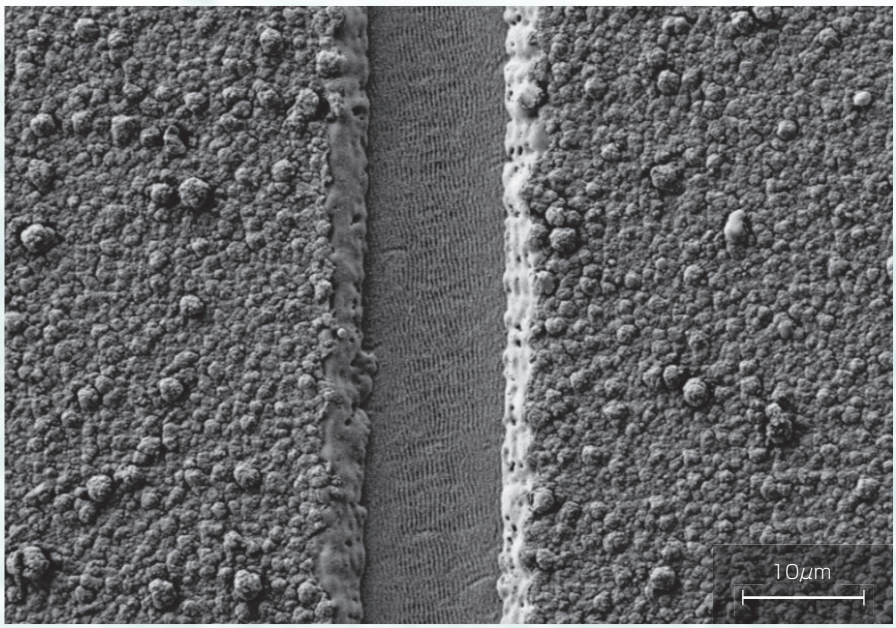


図2　構造形成したCIS太陽電池。

紙は基板材料としての熱的安定性が優れているので、紙の基板上にあるPEDOT：PSS層の加工は難しくない。したがって、基板の損傷なしに高分子層をアブレーションできるエネルギーの条件は、PEDOT：PSSのアブレーションに必要なエネルギー閾値をはるかに超えてしまう。しかし、箔の場合と同様に、パルス継続時間と波長が短くなると、アイソレーション切断は基板のさらに少ないアブレーションでもって実現できることが観測された。

フレキシブルCIS太陽電池

オープンリール方式の加工プロセスはフレキシブル太陽電池の生産にも利用できる。超高速パルスレーザによるCIS太陽電池のレーザ加工法は、多層膜の損傷の少ない選択アブレーション加工法として確立されている（**図2**）。この方法はすでに、最近の3Dマイクロマックのプロジェクトにおいて実証されている。

また、ポリイミド膜上に1.5μm厚のCIS吸収層をピコ秒レーザで微細加工する生産プロセス技術も開発されている。CIS層の加工は約1μJを超えるエネルギーが必要になる。**図3**はCISを加工した結果を示している。細流のエッジには微細構造の変動が見られるが、これは5μm幅の吸収層の領域がわずかに融解し、その後に固化したことを示している。

アブレーションの選択性は、断面の化合物の透過電子顕微鏡法（エネルギー分散X線分光法を含む）とラマン顕微分光法による研究により立証された。さらに、損傷なしの加工、とくにCu_xSe相の機能を損なわない加工も実証された。

レーザスクライビング

導電性と半導体の高分子の大きな利点は、高い蒸着スループットのコーティング加工を実現できることにある。この特徴は将来の低コスト太陽電池の生産に大きな可能性をもたらす。太陽

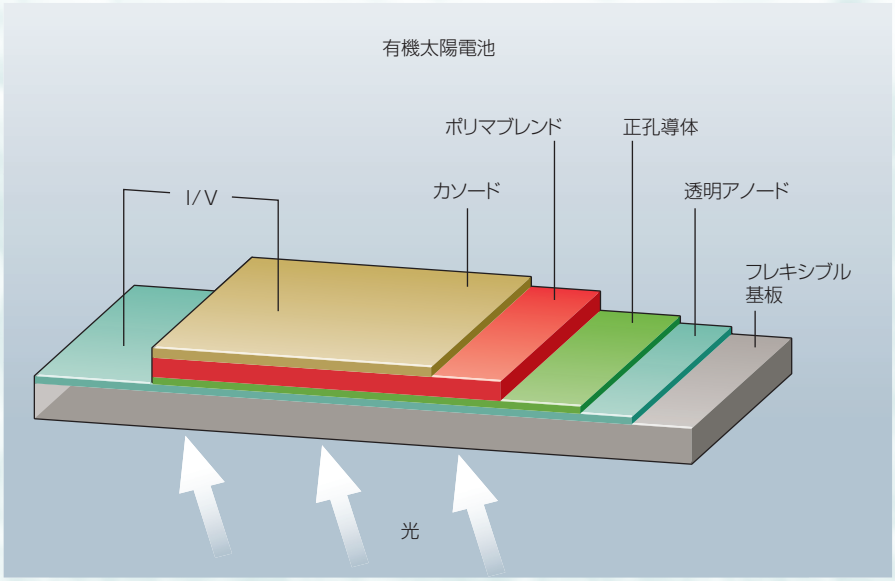
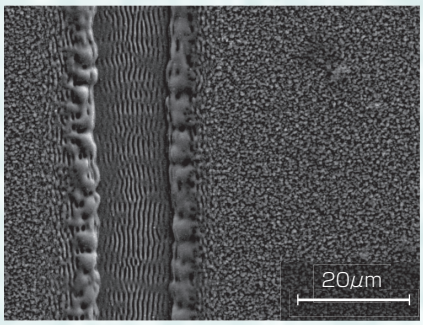


図4　有機太陽電池の積層構造。



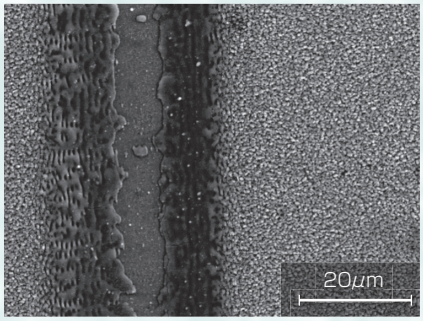


図3　構造形成したCISのプロセスの最適化（上）と効率の最適化（下）。

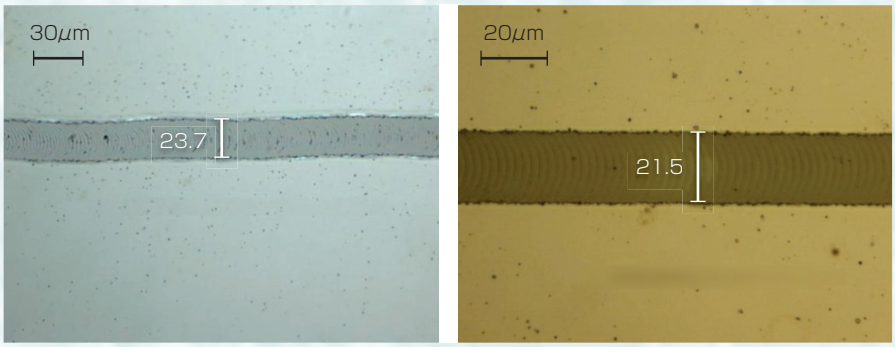


図5　PET箔基板上のITOの上面図。1064nmのピコ秒レーザの場合（左）と1024nmのフェムト秒レーザの場合（右）。

電池のパターン形成は構造形成された印刷工程、あるいはシリコン太陽電池用としてすでに確立された高精密レーザスクライビングを用いることで可能になる。この場合のスクライビング実験は、波長、パルス継続時間および平均出力パワーの異なる4種類のレーザ光源を用いて行われた。ナノ秒パルスの場合は2種類のレーザ、つまり200Wの最大平均パワーをもつ1064nmレーザと、20Wの平均パワーをもつ355nmレーザが使用された。超短パルス領域ではピコ秒レーザとフェムト秒レーザが使用された。ピコ秒レーザは1064nm、532nm、355nmの3波長を放射し、1064nmの最大平均パワーは40Wであった。すべての実験は高性能ガルバノメータと適切なf - θレンズを組み合わせて行われた。加工された太陽電池は通常の積層構造からなり、**図4**は膜の構成を示している。

ITO層のパターンニングは有機太陽電池と有機LEDばかりでなく、より一般的なTFTディスプレイなどの用途においても重要になる。このプロセスはリソグラフィ加工による技術が確立されている。リソグラフィの限界を克服するために（新しいレイアウトの新しいマスク、各種の化学薬品の改良）、いくつかのレーザパターニング試験が行われた。最初の試験には25mm×25mmガラス基板上のITOパターニングが含まれる。

ナノ秒レーザを用いた場合は多数の問題が発生した。何よりもまず、程度に差はあるが、ガラス基板にはどのような用途においても許容できない亀裂が発生した。第二の問題はITOの不規則なアブレーションであり、その原因の一部は二つのレーザのパワー限界が低いことであった。生産工程を安定化するには一定のスクライビング幅が必要になる。これらの構造形成基板は満足な結果が得られず、太陽電池サンプルの製作はまったく不可能であった。

図6　オープンリール方式の標準加工装置。

第二の試験にはPET箔基板上にある約100μm厚のITOのパターニングが含まれた。この試験は真空チャック上に固定されたフレキシブル基板の切片を用いて行われた。＜0.5Wの335nmナノ秒レーザを用いたときのPET箔の損傷は許容されるものではなかった。また、切断エッジには次の後処理工程に適用できない膨らみが発生した。

前述の二種類の超短パルスレーザを用いた二つの試験も行われた。**図5**はPET箔上のITOの加工例を示している。

二種類の超短パルスレーザの利用できるすべての波長を用いた試験の結果、1064nmの波長は十分に適していることが分かった。そのスクライビング品質は他のすべての波長と同様に良好であり、コスト効果はより大きいことが分かった。一般に、SHGおよびTHG部品の使用はコストの増加をもたらし寿命の制約要因にもなる。このような構造形成基板を使用して、パワー変換効率が約2%に達する太陽電池の動作を実現した。

また、1064nm以外の波長も許容できる結果になったが、1064nmは最適の選択になることが分かった。ナノ秒レーザによる試験に比べると、ピコ秒およびフェムト秒レーザによる加工は基板の損傷がごくわずかであった。

標準的なオープンリール装置

図6はオープンリール方式の標準的な加工装置を示している。この装置は600mmまでの幅のマシンロールを扱うことができる。

オンザフライ方式のワークフローは移動基板の画像処理とレーザ加工自体との組み合わせが必要になる。したがって、画像の取得はカメラを改良して行われる。改良したカメラを用いることで、産業用の調整マークによる自動認識が可能になる。巻取りウェブの位置情報にしたがって、ターゲットへのレーザ加工が行われる。

画像処理の照明には二つの個別光源が使われる。拡散板およびその他の光学素子を使用して、不透明材料と透明材料の最適照明が保証される。移動する巻取りウェブへのレーザビーム制御は、レーザ走査装置のベクトル出力を継続的に補正して行われる。オンザフライ補正の欠如はレーザ加工する幾何学配置に画像歪をもたらす。したがって、ベクトル出力は巻取りウェブの速度に応じて制御される。

これらのすべての部品を相互に調整することで、フレキシブル搬送台上の薄膜への設定されたオンザフライレーザ加工が可能になる。

結論

オープンリールシステムはさまざまな基板を巻き付けて加工できる可能性を提供する。オンザフライ技術を使用すると、連続巻取り加工時のレーザ装置は基板の伸縮にも対応し、スループットが大幅に増加する。さらなる技術分析から明らかにされたように、フレキシブル回路の搬送や太陽電池のレーザ加工に要求される高品質化は、オープンリール方式の標準装置と超短パルスレーザとの組み合わせから非常に良好な成果を得ることができる。

謝辞

本稿で報告した研究BMBF（ドイツ連邦教育研究省）の研究助成（プロジェクト番号03WKW04Aと13N10315）を受けて実施した。著者のチームはこのプロジェクトの協力者に深く感謝している。

著者紹介

クリスチャン・ショルツ（scholtz@3d-micromac. com）は3Dマイクロマック（3D-Micromac AG、ドイツ、ケムニッツ）のR&Dエンジニア。

ILSJ