

【研究報告】

【投稿論文再掲】 本論文は許可を得て、「天田財団 助成研究成果報告書 2022」から転載しました。

超短パルスレーザーによる表面加工と選択めっきを用いた 配線パターンニング技術の開発

地方独立行政法人岩手県工業技術センター 機能材料技術部

上席専門研究員 目黒和幸

(2019年度 一般研究開発助成 AF-2019206-B2)

キーワード：三次元成形回路部品(3D-MID)、表面改質、無電解めっき

1. 研究の背景と目的

スマートフォンなどの携帯型情報通信機器や自動車および車載機器において、CMOS イメージセンサ、加速度・傾斜センサ、各種 LED などの実装部品点数が増加傾向にある。これらの機器では限られた空間内に効率的に電子回路基板を配置したいというニーズが高まっており、三次元成形回路部品(3D-Molded Interconnect Device；3D-MID)^[1]が解決策の一つとして期待されている。3D-MIDは、樹脂成形体表面に金属膜で三次元的な電子回路を形成した機械的機能と電気的機能を兼ね備えた高機能部品であり、一般的なプリント配線板と比較して、省スペース化・軽量化、自由度の高い設計、部品点数および組立工数の削減など、様々なメリットがある。3D-MIDの製造方法は各メーカーから様々な工法が提案されているが、三共化成(株)と筆者らのグループで開発を進めてきた SKW-L2 工法^[2]は、樹脂材料へ特殊な添加物の混練あるいは樹脂成形体表面への事前処理を必要とせず、市販されている様々な種類やグレードの樹脂に適用可能なユニークな工法である。SKW-L2 工法は、図 1 に示すように樹脂成形体表面に局所的にレーザー光を照射して表面改質を行い、その後の

湿式処理による選択的な無電解めっきで配線パターンを形成するアディティブ工法である。表面改質用のレーザー光源として超短パルスレーザーを用いることで、可視域で透明な PC(ポリカーボネート)樹脂や難めっき材料である PPS(ポリフェニレンサルファイド)樹脂等への微細配線パターン形成を行うことができる^[3,4]。しかしながら、樹脂表面をレーザー加工するため、現状の SKW-L2 工法では少なからず表面が粗化されており(典型的には Ra 2~5 μm)、金属めっき膜の密着メカニズムは樹脂の表面粗さによるアンカー効果が支配的であるとされている。これからの携帯端末や車載機器では次世代移動通信システム(Beyond 5G/6G)への対応が不可欠であり、3D-MIDにおいても高周波伝送に対応するべく低誘電率・低誘電正接の樹脂材料への適用と、導体損失を低減させるための平滑界面を持つめっき配線技術が求められる。

本研究では、短波長化した超短パルスレーザーによる樹脂表面改質における照射パワーおよびビーム走査速度などの加工パラメータの最適化を検討し、SKW-L2 工法の樹脂表面粗さの低減の可能性を調査した。

2. 実験

実験には、図 2 に示す PPS 樹脂の板材(厚み 2 mm, 東レプラスチック精工 無充填グレード PPS-2000)を用いた。PPS 樹脂は耐熱性・寸法安定性・耐薬品性に優れ、電気自動車関連で 3D-MID 化のニーズが高い。PPS 樹脂試料は中性洗剤、純水、エタノールで脱脂洗浄を行った後、十分に乾

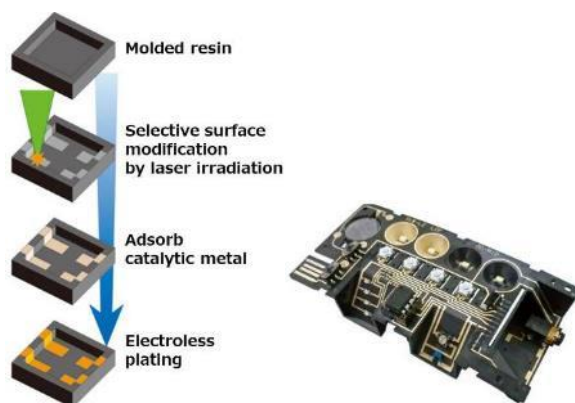


図 1 SKW-L2 工法の工程(左)と 3D-MID 製作例(右)

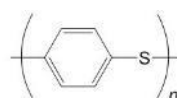


図 2 PPS 樹脂の分子構造(左)と試料の写真(右)

燥させてから使用した。

SKW-L2 工法の光源の超短パルスレーザーには、Light Conversion 社の PHAROS-4W を使用した。このレーザーは、最大出力 4 W、中心波長 1,030 nm の Yb:KGW レーザーである。fs 発振したレーザー光をチャープパルス増幅する際、再生増幅部で繰返し周波数を 1~200 kHz、パルス圧縮器でパルス幅を 260 fs~10 ps の範囲で調整できる。可変アッテネータによるパワー調整と空間フィルターによるビーム整形を行った基本波に対して第二次高調波(SH, $\lambda = 515 \text{ nm}$)を発生させ、自動 XY ステージを用いた加工システムを構築して樹脂の表面改質実験を行った。

レーザーにより表面改質された試料は、表 1 に示す工程で無電解 Cu めっきを行い、局所めっきの可否について評価を行った。

表 1 無電解 Cu めっき工程

アルカリ脱脂	2分
コンディショニング	2分
触媒付与	2分
活性化	1分
無電解 Cu めっき(初期)	15分
無電解 Cu めっき(厚付)	60分 (約 3 μm)

3. 実験結果

3.1 SH 光加工システムの構築

新設した SH 光加工システムの光路図と写真を図 3 に示す。本研究で用いた超短パルスレーザーは、普段は超短パルスレーザー微細加工機として機器開放貸出利用しているため、その性能に影響を与えないように基本波光路上にフリップミラーを設置して必要時のみ SH 光加工システムを使用できる構成とした。基本波を $\lambda/2$ 波長板を通して偏

光状態を整えた後、BBO 結晶(Eksma Optics, BBO-655H)を用いて SH 光を発生させた。基本波 4 W の入射に対して発生した SH 光強度は約 860 mW、変換効率は約 21.5% であった。現状の基本波のビーム径は約 2.5 mm であり、ビームをさらに小さな径にコリメートしてから波長変換すれば効率は向上するが、光学定盤の空間的制限によりコリメータを設置できなかった。発生した SH 光はダイクロイックミラーを使って基本波と分離し、 $f = 100 \text{ mm}$ の平凸レンズを用いて試料表面へ照射する。試料表面での SH 光スポット径は約 35 μm であった。

試料位置は、3 軸自動ステージ(シグマ光機, SGSP20-85 および SGSP40-5ZF)をパソコンおよび PLC を用いて制御を行うことができる。試料移動量は XY $\pm 42.5 \text{ mm}$ 、Z $\pm 2.5 \text{ mm}$ 、試料移動速度は最大 20 mm/s である。なお、試料は真空吸着板で固定する。

3.2 SH 光を用いた SKW-L2 工法の評価

表 2 に示す SH 光照射条件のとおり照射パワーを 7 水準、走査速度を 6 水準の条件で振って試料の表面改質を行った。繰返し周波数は 100 kHz に固定、SH 光のパルス幅については未測定であるが、基本波に対して PHAROS-

表 2 SH 光照射条件

波長	515 nm
レーザーパワー	10, 20, 30, 40, 60, 80, 100 mW
走査速度	0.2, 1, 2, 5, 10, 20 mm/s
繰返し周波数	100 kHz
パルス幅	260 fs (基本波での値)
照射ピッチ	20 μm

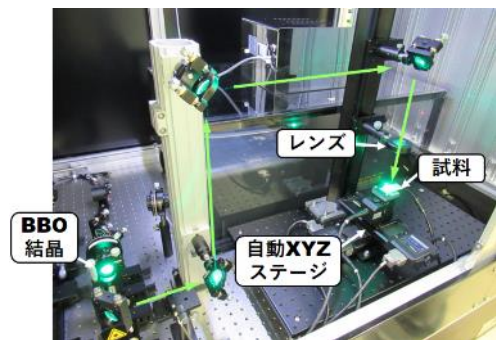
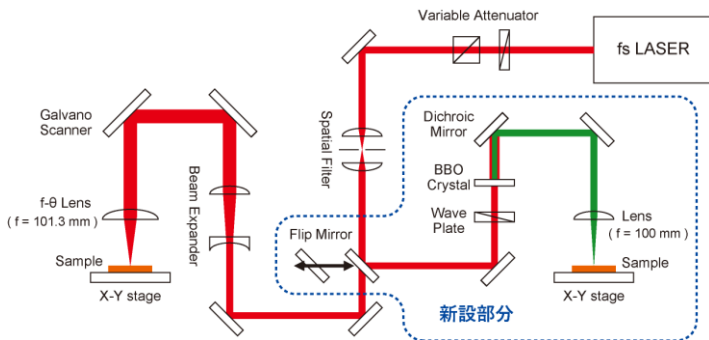


図 3 新設した SH 光加工システムの光路図(左)と写真(右)

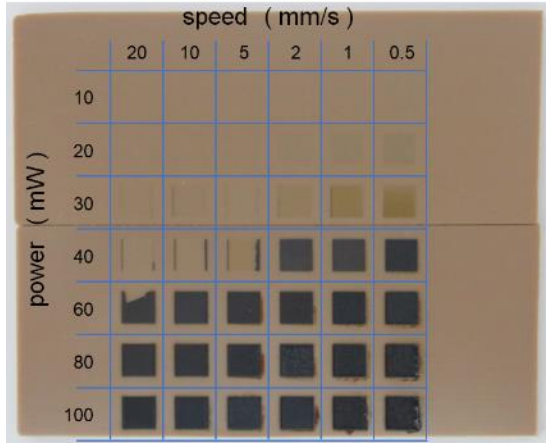


図4 SH 光照射による表面改質を行った結果

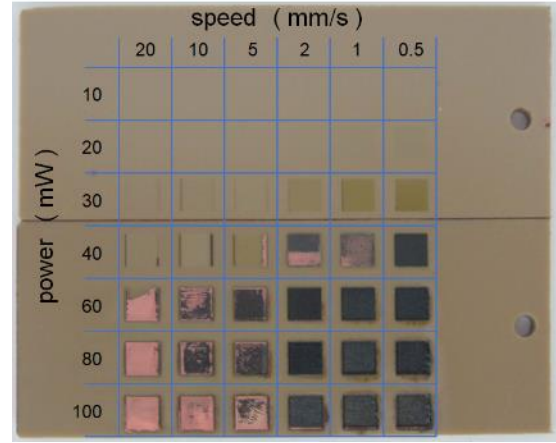


図5 表面改質後に無電解 Cu めっきを行った結果

4W の最短値である 260 fs に設定した。レーザー表面改質する領域は、X 方向(横線)に 3 mm のライン描画を Y 方向に 20 μm ピッチで繰返して 3 mm \times 3 mm の領域を表面改質した。SH 光で PPS 樹脂に表面改質を行った結果を図 4 に示す。照射パワーと走査速度の条件に対して視認しやすいようにマトリクス状に表面改質を行った。図中の左上から右下に向かうに従って、試料表面の 1 点当たりに照射されるエネルギーの量が増加する。10 mW \cdot 20 ~ 2 mm/s の領域では試料表面に変色が生じていないのに対して、80 mW \cdot 1 ~ 0.5 mm/s の領域では加工領域の熔融や加工範囲外への変色の広がりが見られた。40 mW \cdot 20 ~ 5 mm/s で顕著に観測されているように、加工領域の左右の端のみ加工される現象がみられるが、これは自動ステージ走査の加減速領域で中央部より SH 光照射量が増加することによるものである。

図 5 に SH 光で表面改質を行った試料に無電解 Cu めっきを行った結果を示す。照射パワー 30 mW 以下の照射条件では走査速度に関わらず全くめっきが析出してない。一方、40 mW 以上では走査速度 2 mm/s 以下の条件でめっきが析出しないことが確認された。表面改質条件の内、60 mW 以上 \cdot 10 mm/s 以上の領域でめっきの選択析出性が確認できるが、概ね走査速度が速い方が良好な様に見える。より詳しくこの差について調査するために、各表面処理後およびめっき後の樹脂表面についてレーザー顕微鏡により観察した結果を図 6 に示す。未処理の PPS 樹脂表面は Ra 0.25 μm で、直径数 μm 程度の穴が無数に空いている。30 mW \cdot 2 mm/s の条件の場合、横線の加工痕は確認できるが溝は浅く、Ra 0.64 μm であった。しかし、この条件の改質箇所は親水性が向上せず、めっきは析出しない。60 mW \cdot 20 mm/s および 80 mW \cdot 20 mm/s の条件では









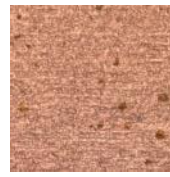
	未処理	30 mW 2 mm/s	60 mW 20 mm/s	80 mW 20 mm/s	80 mW 1 mm/s	(参考) 基本波 での最適条件
表面改質後	 Ra 0.25 μm	 Ra 0.64 μm	 Ra 1.36 μm	 Ra 1.38 μm	 Ra 14.68 μm	 Ra 3.4 μm
めっき後	× (撥水)	× (撥水)			× (撥水)	

図 6 SH 光照射による表面改質後およびめっき後の表面状態と粗さ

Ra 1.3 ~ 1.4 μm 程度と加工痕が明確になり親水性が向上し、無電解めっきの析出性も良好である。照射パワー 80 mW の条件では点状にめっき未析出箇所が確認できるが、60 mW の条件では表面改質時に形成された筋状の模様に沿って一様にめっきが析出している様子が観察され、点状欠陥も無く均一な無電解めっきが行えている。80 mW・1 mm/s の条件では、Ra 14 μm 以上の表面粗さがあり、また SH 光照射部は光沢を示していた。これは SH 光の過剰照射により表面の樹脂が変形・溶解を経たことが示唆される。この条件についても改質箇所は撥水性を示していることから、めっきは析出していない。比較として基本波($\lambda = 1,030 \text{ nm}$)による最適条件で表面改質を行った PPS 樹脂の表面状態を示した⁵⁾。基本波の場合には、ガルバノスキャナと f θ レンズを用いて高速に描画することが可能であり、最適条件の照射パワー 500 mW、走査速度 100 mm/s のとき表面粗さは Ra 3.4 μm であった。基本波の最適条件と SH 光の照射結果を比較すると、表面改質部の表面粗さを低減させる効果があることが明らかとなった。これは PPS 樹脂の近赤外領域と可視域での吸光度および反射率が影響したものと考えられる。

次に、現時点における SH 光の最適条件(60 mW・20 mm/s)でめっきの密着強度について評価を行った。上述の無電解 Cu めっき後に硫酸銅浴による電気めっき(膜厚 25 μm)を行い、90°剥離強度試験を行った。幅 10 mm のパターンを形成した無電解めっき試料と、90°剥離強度試験後の写真を図 7 に示す。めっきの剥離強度は非常に弱く 0.4 N/cm であり、さらにめっき剥離面には電気めっきの際に液の浸透あるいはエッチングされた痕跡が見られた。60 mW・20 mm/s の SH 光改質条件は親水性の向上によりめっき析出はするものの、樹脂表面へめっき金属を強固に結合させるための化学種や物理的アンカー構造を有していないことが示唆される。

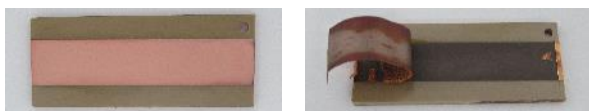


図 7 無電解めっき後(左)、90°剥離強度試験後(右)

4. まとめ

耐熱性や耐薬品性が高く電気自動車関連で 3D-MID 化のニーズが高い PPS 樹脂に対して、超短パルスレーザの第二次高調波による SKW-L2 工法における樹脂-めっき界面粗さの低減の可能性について調査を行った。準備段階として、超短パルスレーザ微細加工機としての性能に影響を与えないように新規に SH 光発生ラインを組上げ、自動ステージ制御で試料を操作できる SH 光システムを構築した。照射パワーと走査速度を複数の条件で振って表面改質の最適条件の評価を行い、照射パワー 60 ~ 80 mW、走査速度 20 mm/s 程度の照射条件の時に樹脂表面粗さ Ra 1.3 ~ 1.4 μm で無電解 Cu めっきに対して良好な選択析出性を確認することができた。これにより従来の基本波による表面改質条件よりも表面粗さを低減させることができた。しかし、表面改質部分へ析出しためっき膜は 90°剥離強度試験で 0.4 N/cm 程度であり、樹脂表面と十分な密着強度を有していないことが明らかとなった。今後は、表面改質箇所への別な化学的修飾手法との併用も検討してめっき密着強度を向上させる試みを行い、高品質な 3D-MID の開発を継続していく予定である。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団 2019 年度一般研究開発助成(AF-2019206-B2)を受けて行われたものです。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 中川威雄, 湯本哲男, 川崎徹, 「MID (射出成形回路部品)」, シーエムシー, (1997).
- [2] 目黒和幸, 村上総一郎, 吉澤徳夫, プラスチックス 65(4), (2014) 67-70.
- [3] 目黒和幸, 日本 MID 協会第 14 回定期講演会 (2016).
- [4] 目黒和幸, 村上総一郎, 吉澤徳夫, 菅野信, 第 84 回レーザー加工学会講演論文集, (2016) 216.
- [5] 目黒和幸, 村上総一郎, 山本角洋, 渡辺浩聡, 吉澤徳夫, 第 32 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会講演論文集 (2017).