紫外レーザと分子接合技術を用いた 3D-MID 製造技術の開発

岩手県工業技術センター　ものづくり DX 推進部
部長　目黒　和幸
（2023 年度 一般研究開発助成 AF-2023205-B2）

キーワード：三次元成形回路部品(3D-MID)，分子接合技術，無電解めっき

１．研究の背景と目的

三次元成形回路部品 3D-MID (Molded Interconnect Device)は、立体的な樹脂成形体の表面にめっき等で直接電子回路パターンを形成した部品であり、筐体の内壁面等を有効利用することでプリント配線板やコネクタ類の低減による小型・軽量化、自由度の高い設計が可能、部品点数および組立工数の削減など様々なメリットを有する [1]。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、局所的なレーザ加工あるいは表面改質による付加的パターン形成（アディティブ工法）が現在の主流となっている。その工法の一つが、我々と三共化成（株）らで共同開発した SKW-L2 工法(Sankyo Kasei Wiring - LASER process type 2)であり、図 1 に示すようにレーザ光により樹脂表面を部分的に粗化・表面改質することで親水化し、その箇所にのみ湿式処理によって触媒金属を担持することで選択めっきが可能となる [2]。SKW-L2 工法は、樹脂表面の粗化を伴い（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。

3D-MID は、これまでに各社携帯機器用アンテナに数多く採用されてきた実績を持つ。第 5 世代移動通信システム(5G)においても高周波伝送用途としてのニーズが期待されている。高周波帯（ミリ波帯）では表皮効果がより顕著で 28 GHz 帯における Cu の表皮深さは約 0.39 μm であることから、高周波伝送用途 3D-MID には SKW-L2 工法に代わる別なアプローチが必要となる。そこで我々は、樹脂表面の平滑性を維持したままめっき配線を形成できる岩手大学発の分子接合技術 [3]に着目した。また複数ある分子接合剤の中でも、光反応性分子接合剤 [4]を用いると樹脂表面を粗化させることなくフォトリソグラフィにより局所的に選択めっきすることが可能となる。光反応性分子接合剤は、金属と結合する官能基 X と、紫外線を吸収すると樹脂と共有結合を形成する官能基 Y を併せ持つ有機化合物である。光反応性分子接合剤を樹脂成形体上へ塗布し、部分的に紫外線露光・現像すると官能基 Y が樹脂と共有結合してその部分だけ分子接合剤が残る。残った分子接合剤の官能基 X に Pd 触媒が吸着して選択めっきによりパターン形成することができる（図 2）。このとき、分子接合剤の厚みは数分子層以内（数 nm）であり、樹脂成形体の表面粗さを増加させずにめっき析出できることが利点である。平面試料に対してはマスク露光によりパターニングすることができるが、高周波伝送対応 3D-MID で立体的な樹脂成形体を対象とするには樹脂表面へ集束した紫外光を走査露光するダイレクトパターニング工法の開発が必要である。

本研究では、高周波伝送対応 3D-MID の製造技術開発を目標とし、紫外ランプおよび短波長化したフェムト秒レーザを光源に光反応性分子接合剤を用いて立体樹脂成形体に対するダイレクトパターニングの検討を行ったので報告する。



図 1　SKW-L2 工法（左）と 3D-MID 製作例（右）

２．実　験

樹脂材料には PS 樹脂（ポリスチレン、PS ジャパン）、SPS 樹脂（シンジオタクチックポリスチレン、出光興産ザレック）、PPS 樹脂（ポリフェニレンサルファイド、東

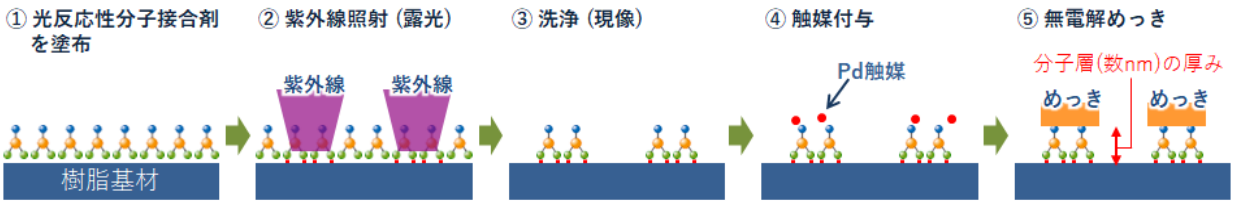


図 2　光反応性分子接合剤を用いた平滑めっき配線形成プロセス

レプラスチック精工 PPS-2000）などの射出成型品を用いた。それぞれの樹脂試料を、中性洗剤、純水、エタノールで脱脂洗浄し、低圧プラズマ処理により汚染物質の除去と表面活性化を行った。その後、（株）いおう化学研究所の光反応性分子接合剤 MB1013 に浸漬、乾燥させることで樹脂基材表面へ分子接合剤を吸着させた。吸着した分子接合剤を樹脂基材へ化学結合させるために必要な紫外光源には、高出力紫外-可視ファイバ光源（浜松ホトニクス L10290-01）あるいはフェムト秒レーザ（Light Conversion PHAROS-4W）の第 4 次高調波（波長 257 nm）を用い、適切な露光量に調整して紫外光露光によるダイレクトパターニングを行った。紫外光露光された試料を現像し、Pd 触媒付与・活性化を行い、その後無電解 Ni めっきを行った。

３．実験結果

3.1　紫外ランプ光源によるダイレクトパターニング

図 3 にダイレクトパターニング実験機の構成を示す。三軸自動ステージにより、試料を XY 軸方向に移動、レンズ系を一体として Z 軸方向に移動する構成となっている。光反応性分子接合剤 MB1013 を反応させるためには 254 nm 近傍の UV-C 領域の紫外光を必要とするため、ファーストステップとして重水素ランプとハロゲンランプを内蔵したファイバーカップリング紫外光源を用いて実験を行った。重水素ランプは 200~400 nm の波長領域の光を放射しており、コア径 φ0.8 mm の光ファイバを通して出力し、レンズにより集光されて試料表面へ照射される。UV-C 紫外線強度計（測定領域 248~260 nm）での実測強度は<0.2 mW 程度である。ランプ光源からの放射は波長領域が広く、インコヒーレント光であるため集光径を小さくすることは非常に困難である。図 4 に複数のレンズと反射型対物レンズを用いた場合の集光系をシミュレートした結果を示す。水銀灯の輝線である波長 254 nm を基準波長として設定すると最小スポット径約 80 μm で、フォーカス位置に対して±0.3 mm 程度は小さく集光されている状態にすることが可能である。

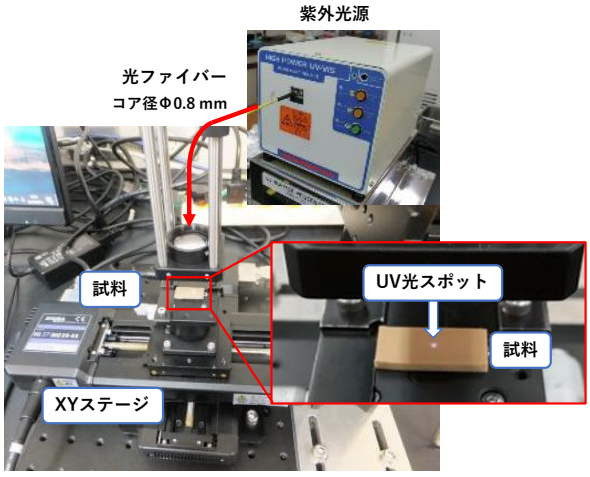


図 3　高出力紫外-可視ファイバ光源を用いたダイレクトパターニング実験機の構成

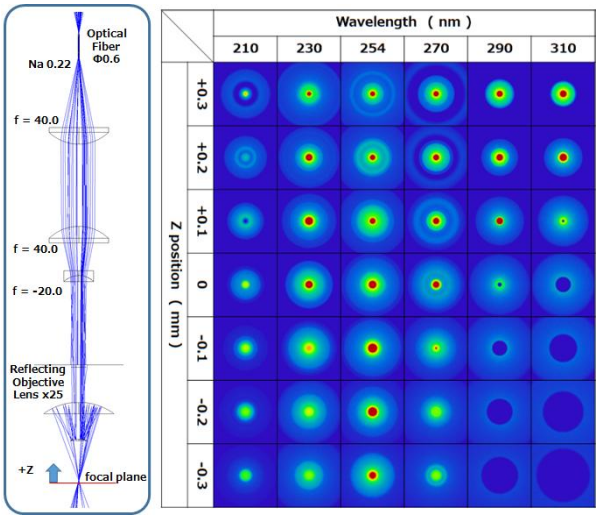


図 4　ランプ光源の集光系のシミュレーション結果

このシミュレート結果を基に光学系を構築し、PC 樹脂平板に対して走査速度を振ってダイレクトパターニングを行った結果を図 5 に示す。十分に遅い走査速度の場合にはビームスポット径の 3.5 倍程度の線幅約 0.3 mm のパターンが形成され、速度が上がるにつれて 0.25 mm/s では線幅が 0.2 mm に細り、それ以上速くなると線がかすれてパターンが形成されなくなることが分かった。実際に樹脂成形体へパターン形成を行った結果を図 6 に示す。図 6-(a)は高低差 1 mm の 45° 斜面を有する SPS 樹脂、図 6-(b)は高低差 0.5 mm の 90° 段差を有する透明 PC 樹脂に対して、フォーカス位置を固定したまま平面内を走査速度 0.2 mm/s で走査してパターンを描画した結果である。それぞれ斜面や壁面へ、ややパターンにくびれが生じているが線幅約 0.3 mm でパターン形成できていることが確認できる。Z 方向への走査無しでもパターン形成できているのは、前述のシミュレーションの通りフォーカス位置を基準として±0.3 mm 程度ビームウェストを有しているためであり、シミュレーションと良い一致を示した。

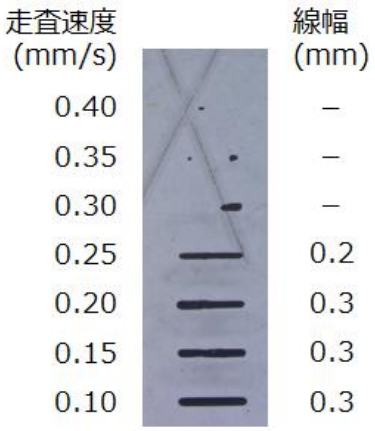


図 5　走査速度の違いによるパターン形成の様子

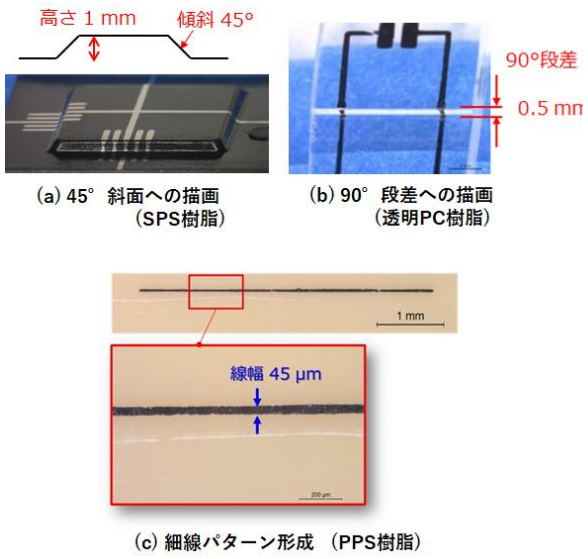


図 6　ランプ光源によるダイレクトパターニング結果

図 6-(c)は PPS 樹脂平板に対してダイレクトパターニングで細線形成のトライした例である。走査速度を速くし、その分複数回描画することで最小線幅 45 μm を達成した。ビームスポット径よりも細い線が描けているのは、ビーム強度分布が中心部で高く、端部では露光量が足りていないためと考えられる。

3.2　紫外レーザによるダイレクトパターニング

前項のランプ光源では紫外光強度が弱く、走査速度が 0.2 mm/s 程度と非常に遅いため、実用化のためには強い紫外光源が必要である。岩手県工業技術センターではフェムト秒レーザ加工機を所有しており、このレーザの第 4 高調波の活用を試みた。光反応性分子接合剤に紫外光露光する目的では超短パルスレーザが必ずしも要求されるわけではないが、これまでの 3D-MID 研究開発で使用してきたレーザシステムであることから使用したものである。図 7 にフェムト秒レーザの波長変換の構成を示す。基本波 1,030 nm のフェムト秒レーザ光を λ/2 波長板を通して偏光状態を整えた後、BBO 結晶(Eksma Optics)を用いて波長 515 nm の第 2 次高調波(SHG)を発生させ、続いて別の BBO 結晶で波長 257 nm の第 4 次高調波(4HG)に変換した。SHG と 4HG を分離するダイクロイックミラーの能力が十分でなかったため、プリズムを使用して 4HG を分離して使用した。出力 1 W、繰返し周波数 100 kHz、パルス幅 260fs の基本波に対して、約 50 mW の 4HG を発生できる。

図 8 に 4HG 紫外レーザ光源によるダイレクトパターニング実験機の構成を示す。集光レンズには焦点距離 100 mm の合成石英平凸レンズを使用した。単色でコヒーレントなレーザ光であるためこのレンズでもビームスポット径を φ100 μm 程度に絞ることは容易である。対物レンズを使用すると、入射パワーを精密に調整しないと焦点でのパワー密度が過剰になりすぎて樹脂試料にダメージを与えてしまうため、使用を控えた。PPS 樹脂に対して焦点距離 100 mm の集光レンズを用いて 4HG 紫外レーザ光照射をすると、15 mW 以上のパワーでは樹脂表面で吸収が生じて変色し、10 mW 以下では樹脂表面に顕著な変化は生じなかった。分子接合剤が無い状態で樹脂試料表面に変化が見られることは望ましくないため、4HG 紫外光照射の最大強度を 10 mW として走査速度を変化させながら光反応性分子接合剤の反応を確認したところ、走査速度 10～20 mm/s でも十分に選択めっきによるパターン形成ができることが確認された。図 9 に、PPS 樹脂においてパワー10 mW、走査速度 10 mm/s の条件で 4HG 紫外レーザ光源によるダイレクトパターニングを行った結果を示す。ランプ光源を用いた場合では走査速度 0.2 mm/s 程度であったのに対して、4HG 紫外レーザを光源にすることで走査速度を大幅に増加させてもパターンが形成できている。パターン線幅は約 160 μm となったが、集光レンズに対物レンズを用いて照射パワーを精密にコントロールすることができるようになればより細いパターンの描画が可能になると考えられる。図 10 に形成しためっきパタ

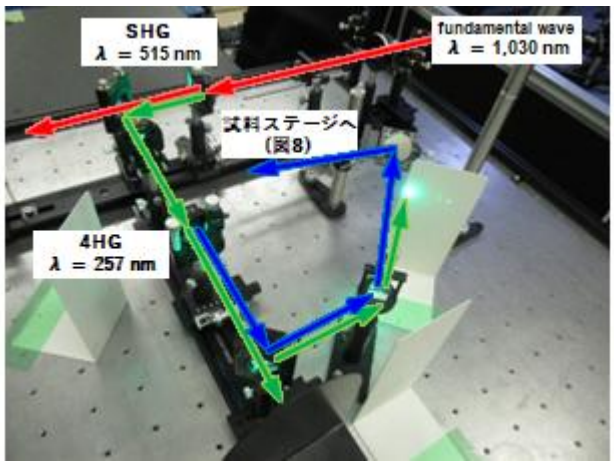


図 7　フェムト秒レーザの波長変換

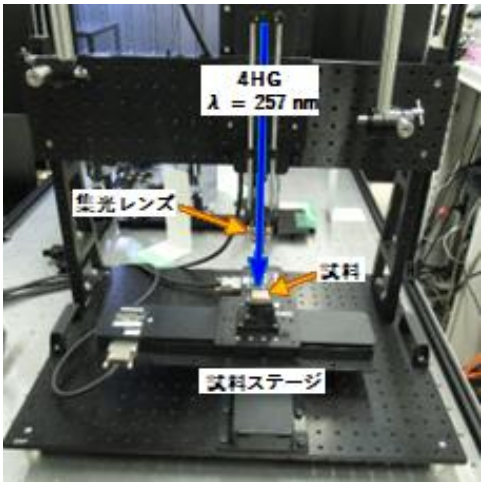


図 8　4HG 紫外レーザ光源によるダイレクトパターニング実験機の構成

ーン部の断面SEM像を示す。めっきー樹脂界面の粗さは、レーザ未照射部の樹脂表面の粗さと顕著な違いはなく、樹脂基材の表面粗さを増加させることなくめっきが析出していることが確認できた。

４．まとめ

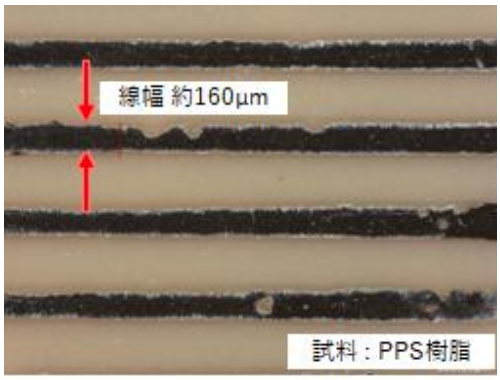


図 9　4HG 紫外レーザ光源によるダイレクトパターニング結果

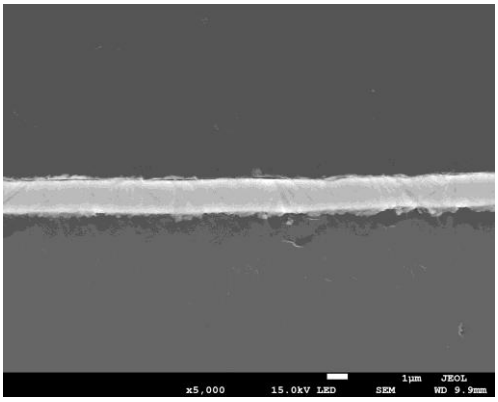


図 10　形成しためっきパターンの断面 SEM 像

高周波伝送対応 3D-MID の製造技術開発を目標として、紫外ランプおよび 4HG 紫外レーザを光源に光反応性分子接合剤を用いて立体樹脂成形体に対するダイレクトパターニングの検討を行った。紫外ランプを用いた場合、走査速度 0.2 mm/s 以下で線幅 0.3 mm 程度のパターンを描画することができ、45° 斜面や 90° 段差を有する立体樹脂成形体へも連続した配線パターンを形成することに成功した。走査速度を上げる代わりに同じ箇所を複数回描画することで最小線幅 45 μm の細線パターンを描画することができた。紫外ランプでは描画速度が極端に遅いことから、フェムト秒レーザの 4HG 紫外光を光源としてダイレクトパターニング実験を行ったところ、走査速度 10～20 mm/s でもパターン形成可能性であることと、めっきー樹脂界面は平滑なまま接合されていることが確認できた。

図 9 で示したように形成したパターンの形状が悪いのはレーザ照射によるものでは無く、分子接合剤の塗布ムラが生じているためである。パターン中に見える円形あるいは半円状の欠けは分子接合剤を塗布した際に水分が吸着して水玉が残ったものであると推察される。このような水玉によるめっき未着箇所が生じるとパターンが途切れることが懸念されるため、分子接合剤を安定的に塗布する方法の開発も重要であることを再確認した。この課題を解決するためには液体を塗布する際に低湿度環境下にコントロールし、乾燥時の溶媒の揮発による分子接合剤の凝集を低減させることが効果的であると考えられることから、図 11 に示すスプレーバルブによる自動分子接合剤の塗布の検討を継続して実施しているところである。今後の成果に期待されたい。

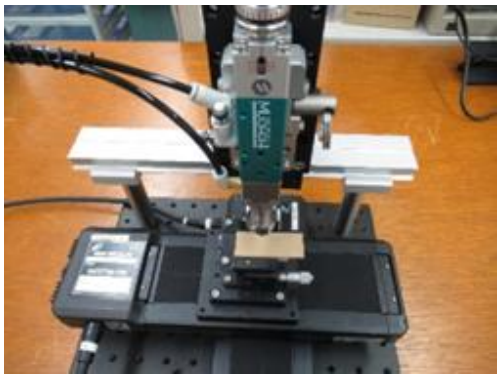


図 11　スプレーバルブによる分子接合剤塗布装置

謝　辞

本研究は公益財団法人天田財団 2023 年度一般研究開発助成(AF-2023205-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。分子接合技術の研究開発の遂行にあたり、村上総一郎主査専門研究員、鈴木一孝主任技術専門員、三浦由美子研究スタッフ、黒須恵美研究スタッフに大きなサポートを頂きました。心よりお礼申し上げます。

参考文献

1)　日本 MID 協会 https://www.jmid.gr.jp
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)　森邦夫、エレクトロニクス実装学会誌、vol.19, (2016)、pp.91-102.
4)　株式会社いおう化学研究所 https://scl-inc.jp