

レーザー援用インクジェット技術の開発

— 高スループットとファイン化の両立を目指した配線技術 —

遠藤 聡人*、明渡 純

次世代のエレクトロニクスデバイス製造技術において、多品種、小ロット生産および低コストかつ大面積化に対応できるフレキシブルな製造技術が求められている。この研究では、配線工程における高スループット化とファイン化を目指して、レーザー援用インクジェット技術を開発した。配線の微細化を実現するに当たり、外部からレーザーを照射して液滴を乾燥させ、基板上でのインクの濡れ広がりを抑制するという新たな着想に基づいて、これまでは困難であった高スループット化とファイン化を同時に実現し、配線幅10 μm以下でアスペクト比1以上の微細配線描画に成功した。この論文では、レーザー援用インクジェット技術開発に至る、ニーズに基づく技術開発課題設定、それを克服するための過程等、研究開発の流れと展開について報告する。

キーワード：インクジェット印刷、スループット、ファインパターン、配線技術、低コスト

Development of laser-assisted inkjet printing technology

– Wiring technology to achieve high throughput and fine patterning simultaneously –

Akito Endo* and Jun Akedo

A new processing technology that can be easily adapted to various circuit designs and production in small lots has been requested for implementation into electronic device manufacturing where low cost device fabrication on large area is required. We have developed a laser-assisted inkjet printing technology which can achieve high throughput and fine patterning simultaneously. To realize fine patterning with low resistivity, ejected ink-droplets have been dried by laser irradiation to suppress expansion on a substrate, a problem often observed in a conventional inkjet process. Drawing of fine wiring with aspect ratio of 1 or above with line width of 10 μm or less has been achieved using this new approach. This paper describes the flow of R&D from needs-driven target setting, process to overcome tasks, to achievement of the laser assisted inkjet printing technology.

Keywords: Ink-jet printing, throughput, fine pattern, wiring technology, low cost

1 背景

産業構造がグローバル化する現在、エレクトロニクス技術は、我が国の経済産業を支える根幹的な分野の一つであり、技術開発の進展と共に、多くの新たなエレクトロニクスデバイスが開発され生産されている。そのような中で、国内外における品質や性能への価値観の違いへの対応、これに伴う価格競争は一層厳しさを増しており、技術革新としてのイノベーションが必要とされている。

例えば、顧客から注文を受けてから製品を生産する方式であるBTO (Build To Order) のように、現在では消費者からの要求によって電子デバイスに対する個別化・差別化が進み、国境を越えてさまざまなユーザーニーズに対応したカスタムメイドの電子デバイス、電気製品作りが求められている。その結果、必然的に多品種少量、多品種変量生産や製造サイクルの短期化に対応できる製造技術の革新が重要となってきており、開発・製造現場ではそれぞれ

の機能を持つ電子デバイスの集積化による多機能化、小型化、さらには低コスト化と高スループット化や、製造工程の水平分業化により小ロット生産・短納期化が進められてきた^[1]。

他方、工業におけるサステナビリティという観点から、21世紀の“ものづくり”に対しては、最少の資源、最小のエネルギー消費でかつ低環境負荷型の製造技術を基本とすることが強く求められている。産総研では、このような「省エネ・省資源」、「高機能・新機能」、「高生産性・低コスト」という現実には多くのケースで相反する三つの要素を新技術で同時に解決する生産プロセスのコンセプトを「ミニマルマニュファクチャリング」と呼び、これを実現することにより、我が国の製造業の持続的発展、すなわち、環境調和と国際競争力に貢献することを目指している。

このような状況はエレクトロニクス実装の分野でも同様であり、エレクトロニクス製品製造の根幹をなす配線技術に

産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1 つくば東
Advanced Manufacturing Research Institute, AIST 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan * E-mail: aki-endou@aist.go.jp

Original manuscript received August 26, 2009, Revisions received November 9, 2010, Accepted November 18, 2010

関しても、電子回路や電子部品の実装の多品種化・カスタムメイドへの対応が求められている。ここでは、主に半導体微細加工技術を中心としたマスクプロセスによる製造技術が用いられているが、マスク作製工程には高い精度が求められる、高価になることから多品種化は難しいという問題がある。また、FPD (Flat Panel Display) 等の大面積ディスプレイの配線では、マスクの微細化、大面積化、多階調化が進み、マスクのアライメントが困難となり大面積化が問題となっている。さらに、マスクプロセスには、導体金属の成膜、レジストや余分な導体金属の除去、洗浄の工程が必要であり、貴金属や有害物質等が含まれる廃液が大量に排出されるため、省エネ・省資源化への対応が求められている^[1]。

私達が開発を進めているインクジェット印刷技術は、『必要などころに必要なだけフレキシブルに材料を供給することから、オンデマンド・省資源の特徴を持ち、産総研が掲げる「ミニマルマニファクチャリング」コンセプト実現の中核をなす技術である。また、製造工程で排出される多くの廃液が、環境負荷につながることから、マスク不要で廃棄物がほとんど出ないインクジェット印刷技術による配線実装プロセスが大きく期待されている^{[2][3]}。

しかし、これまで、インクジェット印刷技術を配線に応用するに際しては、インク内に含有している導体の抵抗が高い、配線微細化に伴ってスループットが低下する等の解決すべき問題点が多くあった。この論文では、ミニマルマニファクチャリングのコンセプトのもと、実用的な微細インクジェット配線の実現に挑戦した研究開発の過程を報告する。

2 多品種化生産に向けたそれぞれの製造技術の状況と開発技術の選択

2.1 デバイスの多機能化に伴うICチップの集積化とそれに伴う技術開発の流れ

これまで、電子デバイスの多種多様化に伴って、デバイスの機能に応じた IC パッケージが製造されてきた。その中で、IC チップの小型化、高機能化、低消費電力化を実現するために、1 チップ内にさまざまな機能を集積した SoC (System on a Chip) の開発が進められてきた。

SoC では、1 チップ内に機能を集積するため、新規なプロセス技術として単一のパッケージ内に IC チップを挿入した SiP (System in Package)、すなわち、パッケージ内に開発済みの IC チップを組み合わせることで多機能化を実現してきた。そして現在では、さらに電子製品の小型化・多機能化が進み、IC パッケージの実装面積を減らすため、IC パッケージ内の IC チップを IC スタック

クという積層化した形で 3 次元集積化する方法が行われてきた (図 1)。そして、ここでは、積層化された IC チップを接続する 3 次元実装技術が重要なキーテクノロジーとなっている。

これまででは、IC チップの 3 次元実装において、フリップチップ実装による電氣的接続が行われてきた。具体的には、IC チップ入出力端子上にハンダボールとハンダ付けパッドを設置し、リフロー炉で熱をかけてハンダを溶融して電極端子と接合する方式 (Ball Grid Array) や、メッキ加工によるバンプで IC チップ間を加熱加圧し、電気端子を接合する方法等が採用されている。

しかし、IC チップの多層化が進むにつれてバンプが小型化し、接合欠陥の検査が困難になる、バンプ搭載のコストが上昇する、層間接続に必要な微細 Si 貫通ビアの設置が困難になる、IC スタックの厚みを薄くするためには Si 基板の超薄加工が必要となる等、多くの課題が顕在化している。

一方、IC チップに段差を付けることによって入出力端子を表面に出し、ワイヤボンディングによって IC チップとインターポーザやリードフレーム間の電氣的接続をとる方法もある。しかし、ワイヤによる配線は、素子間の距離が長く、配線の高密度化が困難であり、ワイヤのインダクタンスの増加によって高速伝送に限界が生じる等、解決が困難な課題が残されている^[4]。

以上のように、積層化された IC チップ側面の配線や、チップ間の段差を乗り越えて電氣的接続が可能な 3 次元実装技術の開発が急務となっている。

2.2 各プロセス技術の特徴とインクジェット印刷技術の技術課題

近年の集積化によって IC チップ内のデザインルールが

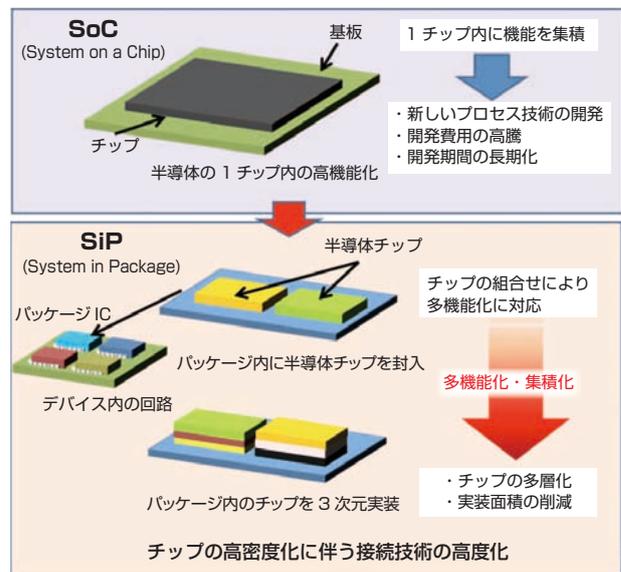


図1 多機能化に伴う IC チップの高密度集積化の流れ

100 μm 程度からサブミクロンになり、それに伴って3次元実装技術における配線技術の微細化が重要となってきた。同時に、配線技術に対しては、高機能化、省エネ・省資源化、生産効率向上、そして低コスト化への対応が求められている。

この領域において、現時点で、実用もしくは実用化が期待されている配線技術として、マスクプロセス技術であるフォトリソグラフィ技術、μCP (Micro Contact Printing)・ナノインプリント技術、スクリーン印刷技術、および、マスクレスプロセス技術であるMIPTEC (Microchip Integrated Processing Technology)、インクジェット印刷技術を取り上げ、図2に比較して示す。

マスクプロセスにおけるフォトリソグラフィ技術は、感光性有機物質をパターン状に露光してレジストを作製し、基板上に成膜した金属膜をエッチングすることで所望のパターンを作製する。このため、露光に用いられる光の波長に依存するマスクの回折限界まで微細化が可能であり、半導体チップからPCB (Printed Circuit Board) 等までの幅広いデザインルールに対応可能となっている。μCP・ナノインプリント技術は、金型原板を樹脂基板等に転写することで微小な構造体の作成が簡易にでき、数ミクロンからサブミクロンで微細配線が可能な半導体チップ実装技術として開発が進められている。また、スクリーン印刷技術は、PCB等の基板上に孔版を用いて導電性ペーストを刷りつけることで所望のパターンの配線を描画する方法であり、50 μm程度の配線を描画することが可能となってきたことから、表面実装技術として用いられている^[2]。これらのプロセス技術は、マスクもしくは型版を用いることから、凹凸のある基板上での3次元実装への適用は、とても困難である。

一方、マスクレスプロセス技術として、プログラムを書き換えるだけで容易にパターン変更が可能であり、マスクレスで配線の描画ができるMIPTECは、YAGレーザーや

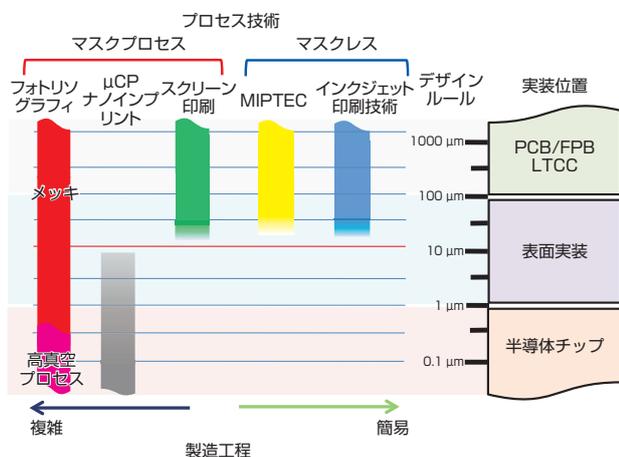


図2 実装位置に対応する配線幅と配線技術

YVO4レーザーにより無電解メッキによって成膜された金属膜配線をアブレーションすることで、3次元でのパターンングが可能のため、立体形状のコネクタ等多品種化に対応した生産が可能となる3次元実装技術として大きな期待が寄せられている。さらに、有機エレクトロニクス分野で開発が進んでいたインクジェット印刷技術^[5]は、導体となるナノサイズの金属粒子を溶媒に分散したインクを必要とときに必要な量だけ塗布するマスクレスプロセスであり、凹凸基板面への描画も可能である。近年では安定して配線幅50 μm程度の配線描画が可能となったことから、3次元実装技術への応用が期待されている。

次に、それぞれのプロセス技術と技術要素の特徴について比較を行った(図3)。現時点で最も実用的なプロセス技術となっているフォトリソグラフィ技術は、ファイン化、高スループット、歩留まりが高いという特徴を活かして技術開発、深化が進められてきた。また、μCP・ナノインプリント技術はファイン化、スクリーン印刷技術は高スループットを特徴として、MIPTECはマスクレスプロセスの優位点である多品種化を特徴として実装技術の開発が進められてきた。

一方、インクジェット印刷技術は、多品種化、低コスト化、省エネ・省資源化が可能という他のプロセス技術にない特徴をもち、ミニマルマニファクチャリングの要となる可能性をもっていることがわかる。しかし、これまでは、高い生産性を実現するために必要なスループットが低く、かつ歩留まりも低いという克服すべき技術課題があった。

3 技術課題と解決手段の選択

3.1 配線描画速度の低下の原因となるインクの濡れ広がり

配線を描画するインクジェット印刷技術は、ドットをつなぎ合わせることによって配線を描画するため、ドット形状を等間隔に並べるこれまでの家庭用インクジェット技術とは異なったプロセス因子の設定と選択が必要である。具体的には、配線描画速度と吐出周波数、インク粘度と表面張力、基板へのインクの濡れ性等の要因により、ドットのつなぎ合わせの状態は変化し、描画される配線パターン形状

| | 機能性 | | 生産性 | | 生産コスト | | 環境性 | |
|--------------|-------|------|---------|------|-------|---------|--------|--------|
| | ファイン化 | 多品種化 | 高スループット | 大面積化 | 製造コスト | 製造工程の短縮 | 省エネ省資源 | 高い歩留まり |
| フォトリソグラフィ技術 | ◎ | × | ◎ | △ | × | × | × | ◎ |
| μCP・ナノインプリント | ○ | △ | △ | × | △ | △ | △ | △ |
| スクリーン印刷 | △ | △ | ◎ | △ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| MIPTEC | △ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | △ | ○ |
| インクジェット印刷技術 | △ | ◎ | × | ◎ | ◎ | ○ | ◎ | × |

図3 各配線技術と技術要素の特徴

は大きく影響される。

これまでのインクジェット印刷技術では、着弾したインクが基板の面方向に濡れ広がるため、インクの表面張力や粘度、基板の濡れ性を制御したとしても、液滴径より配線幅が広がってしまう。例えばステージ速度 100 mm/s、吐出周波数 30 kHz の条件では、液滴直径 15 μm の液滴を接触角が 60° 程度の基板に着弾させた場合、配線幅が 50 μm 程度となり、液滴径の数倍に広がる⁶⁾。そのため、幅 10 ~ 20 μm 程度の微細な配線を行うためには、液滴径は 10 μm 以下に小径化する必要がある。

このことは、配線抵抗を一定に、すなわち、配線単位長さ当たりのインク供給量を一定としつつ、スループットを維持するためには、液滴径の減少分の逆数に対して吐出周波数を 3 乗倍と大幅に高くしなければならないことを意味する。

しかし、インクジェットヘッドの吐出周波数を高くするにしがたがって、①ノズルオリフィスに形成されるメニスカス（インクと空気の界面）が吐出により振動し、これが静止しないうちに次の吐出が起こると、吐出がとて不安定となる、②インクジェットヘッドのイジェクタ内のインクの加減圧に伴うさまざまな振動モードが発生する等、吐出が不安定となる等の問題が生じてくる。また、液滴径、オリフィス径、アクチュエータの変位量、インクの物性（表面張力や粘度等）等、多くのパラメータを同時に最適化する必要がある。このため、既存技術で限界となっている数十 kHz 程度の吐出周波数⁷⁾を大幅に高くすることはとても困難である。

すなわち、これまでのインクジェット配線技術では、配線の微細化とスループットの確保は相反するトレードオフの関係となっており、これを克服するためには液滴が基板に着弾した後の濡れ広がりを抑制するための技術開発のブレークスルーが必要となっていた。

3.2 これまでの濡れ広がり抑制手段

まず、私達は、着弾したインクの濡れ広がりというインクジェット印刷技術における本質的な問題の克服を開発課題と設定し、これまでの研究開発においてインクの濡れ広がりを抑制するためにどのような手段が検討されてきたか、またその結果としてなぜこれまでスループットの向上がなされなかったのかを以下に整理した（図 4）。

1) インクの改良による比抵抗の低減

インクの濡れ広がりの抑制方法を考える前に、そもそもインク材料をより低い比抵抗をもつ材料に置き換えれば配線抵抗を低くできる可能性がある。しかし、明らかにインクの比抵抗をその中に含まれる金属の比抵抗以下に下げることができない。具体的には、現在の市販インクの小粒子銀インクの比抵抗は $2 \sim 5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ であり、銀金属の 1.6×10^{-6}

$\Omega \cdot \text{cm}$ の数倍程度であることから、インク材料の改善による比抵抗低減の余地は数倍程度と少ない。したがって、インクの改良による配線抵抗の低減は、開発課題として設定しなかった。

2) 高粘度のインクの使用、液滴の小径化

高粘度インクを使用すると、前述したように、メニスカスの問題や吐出安定性を阻害する振動モードが起こることから、吐出周波数の低下すなわちスループットの低減につながる。また、ノズルが詰まりやすくなるという問題も生じてくる。液滴径を小さくする方法では、スループットの低下が避けられず、さらに、ノズルの小径化に伴うノズル詰まりの問題が生じてくる。

3) 着弾後の濡れ広がりを抑制するための基板表面処理

基板表面を処理する方法は、インクの濡れ広がりを抑制しつつ配線幅を減少できる可能性をもつが、表面処理剤によってインクと配線の密着性を下げることにつながる。例えば、はっ水性をもつポリイミドのようなフレキシブルな基板上に水性溶媒の導電性インクによって配線を描画した場合、密着力は低くなる⁸⁾。これを避けるためにインクの密着性向上を目指して、マスクを用いて親水面と疎水面のパターニングを行い、親水面のみにインクを塗布することが試みられているが⁹⁾、これは結局、製造工程数が多くなることを意味し、トータルでのスループットの向上は達成できない。

4) 基板加熱によるインクの乾燥速度向上

インクの乾燥速度を上げるためにエネルギーを援用する方法として、これまで、基板加熱が試みられたが、基板を加熱すると、基板からの熱放射によりノズルが乾燥し目詰まりを起こすこと、基板着弾時に突沸を起こし配線にクラックおよび空隙が発生する等、プロセス上本質的な問題点があり、実用化には至っていなかった。

このように、インクの濡れ広がりの抑制による配線幅の

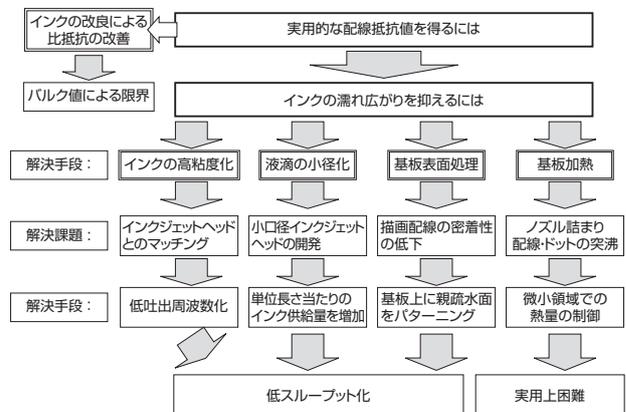


図 4 これまでのインクの濡れ広がりの抑制方法と最終的に得られた効果

ファイン化と配線工程の高スループット化は、まさにトレードオフの関係にあり、これまでの技術では克服できない技術課題であった。

3.3 レーザーエネルギーを用いたインクの乾燥方法の考案

そこで私達は、トレードオフの関係にあった配線幅のファイン化と高スループット化の関係を両立させるために全く新しいアプローチによるプロセス技術の開発に取り組んだ。すなわち、インクの濡れ広がりを抑える方法として、これまでの解決手段である高粘度インクの使用、ノズルの小口径化、基板の表面処理の延長線に取り組みを設定することなく、新たなパスとして、吐出された液滴にエネルギーを援用し、乾燥速度を上げる方法を選択した。

ノズルの乾燥や突沸現象を起こさないように、吐出された液滴に直接エネルギーを投入する方法として、私達は図5に示すように、レーザーを液滴に集光させることによって乾燥を促進し、インクの濡れ広がりを抑制する簡易な方法（以下レーザー援用インクジェット技術）を考案した。

このレーザー援用インクジェット技術は、インクジェットヘッドから吐出された液滴がガラス基板に着弾すると同時に集束レーザー光を液滴及び基板に照射して、熱エネルギーにより瞬時にインク溶媒を蒸発乾燥させる方法である。

このような局所的なレーザーエネルギーの援用によって、ノズル詰まりや基板へのダメージの軽減と、液滴の乾燥と高粘度化によるインク濡れ広がりの抑制が可能となった。

この研究では、シングルヘッドから液滴径 25 μm - 50 μm 程度の液滴を吐出し、波長 10.6 μm の炭酸ガスレーザーを CW (Continuous Wave) モードで吐出液滴の近傍に照射して配線描画を行っている。

3.4 技術開発目標の設定とその狙い

インクジェットによる配線描画技術において配線抵抗を下げられるためには、濡れ広がりを抑え、配線厚を向上する、

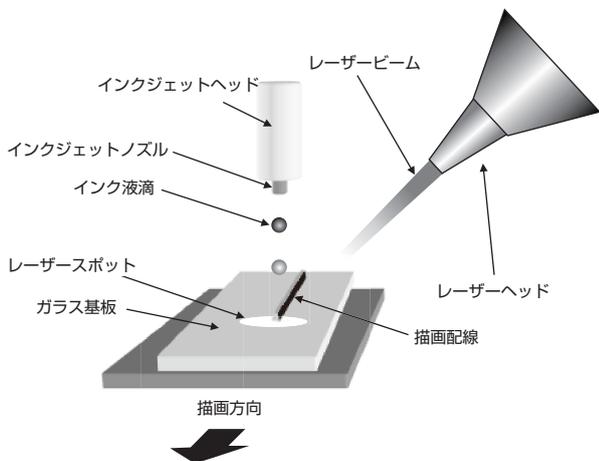


図5 レーザー援用インクジェット技術による配線描画方法

言い換えれば配線のアスペクト比を改善することが必要である。そこで、高いスループットと配線抵抗低減を同時に解決するために、重ね塗りすること無しに高いアスペクト比をもつ配線の描画が可能なプロセス技術の確立を目指して、技術開発目標を設定した（図6）。

インクジェットによる配線描画技術では、まず第一に、吐出される液滴径の設定が重要となる。これまでのインクジェット技術では、一般的に使用されている液滴 20 μm 程度で配線描画した場合は、インクが濡れ広がるために描画後の配線幅は、基板表面処理を行ったとしても 30 - 50 μm 程度が限界とされていた^[2]。また、配線抵抗を下げるために重ね塗りする場合は、描画したインクの乾燥を待たねばならず、描画速度の向上が困難となっていた。

液滴径 10 μm 以下で配線描画^[10]した場合は、液滴の微細化に伴って単位体積当たりの表面積の寄与が大きくなることから^[9]、インクジェットヘッドから吐出された液滴の飛翔中に非線形に蒸発速度が高まるために、着弾したインクの濡れ広がりが抑えられ、配線幅数 μm 以下の配線描画を実現できる。一方、描画速度が低く、配線厚が薄いために、配線抵抗を低くするためには多数回の重ね塗りが必要となり、スループットが低下してしまうという課題があった。

このようなこれまでの技術の限界を克服するものとして、レーザー援用インクジェット技術では、高いスループットを維持しつつ、これまでの技術では困難とされている配線幅 10 μm 以下を実現することを目標とした。

このことから設定した技術課題は、直径 25 μm ~ 50 μm 程度の液滴を使用し、エネルギー援用で乾燥を促すことによって、吐出された液滴径より配線幅を小さくすること

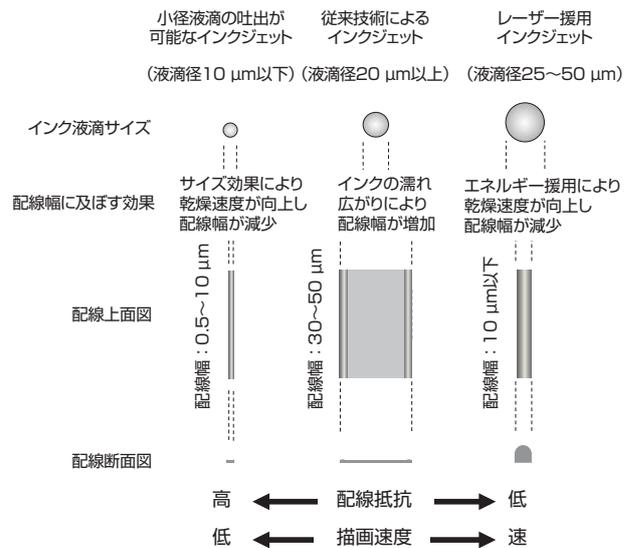


図6 レーザー援用インクジェットが目標とした液滴径と配線パターン

である。また、液滴径を大きくできれば現行のインクジェットヘッドを用いた吐出が可能となり、長期安定性、信頼性が得られ、液滴の運動エネルギーが増すために気流等の影響を受けにくくなり、飛翔した液滴が基板に着弾する精度の向上も期待される。さらに、着弾精度の向上によって、基板とノズル間の距離を広げることも可能となるため、大きな凹凸段差を持つ対象への適用も期待できる。

以上のように、これまでの産業用インクジェット技術の技術課題の整理を行い、本質的な課題を抽出することにより、レーザー援用インクジェット技術の方向性、技術課題、到達目標の設定を行った。

4 レーザー援用インクジェット技術の効果

4.1 レーザー援用による配線の高アスペクト比化

高アスペクト比をもち微細な配線の描画を目的として、レーザー援用の効果が配線幅に与える効果を、未表面処理のガラス基板上への描画によって調べた結果を図7に示す。

液滴径 25 μm 、吐出周波数 3 kHz、ステージ速度 60 cm/min の条件で描画を行ったところ、レーザー援用インクジェット技術で描画した配線の寸法は、配線幅 10 μm 、配線厚 11 μm となり、レーザー援用なしの描画配線と比較して、配線幅が 230 μm から 10 μm と 1/20 倍以下へと減少、配線厚が 0.8 μm から 11 μm と 12.5 倍以上増加、アスペクト比は約 250 倍以上に増加し、極めて大きな改善の効果が確認された。

次に、レーザー顕微鏡によって得られた 3 次元形状を図8に示す。レーザー援用によって描画された配線形状は、これまでのインクジェット印刷技術で報告されてきた配線とは大きく異なり、配線の両側面に淵ができるようなコーヒーステイン現象^{[9][11]}や配線幅が一部膨らむようなバルジ現象^[12]と

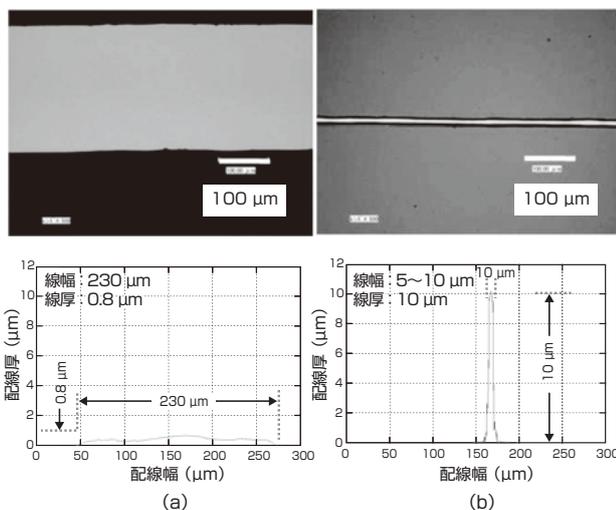


図7 レーザー援用の効果が配線幅に与える影響
(a) レーザー援用なし (b) レーザー援用あり

いう配線の不均一な形状が見られず、均一な滑面であり“半円柱のような構造”となっていることがわかる。

この結果から、レーザー援用インクジェット法によって、およそアスペクト比 1 という、従来法と比較して格段に高いアスペクト比をもつ配線を描画することが可能であること、および液滴直径以下の線幅の配線を未表面処理基板上に描画可能であることが確認できた。

これまでの技術では、基板表面処理を行ったとしても、計算上では、接触角 90° の基板に配線幅 10 μm の配線を描画した場合、一度の描画では配線厚が 290 nm^[6] 程度が限界となる。したがって、導体の比抵抗を 2.0 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ と仮定すると、描画配線の 1 cm 当たりの抵抗値は、表面処理を行ってこれまでの技術で描画した配線では約 70 Ω / cm 程度であるが、表面処理を施していない基板を用いてレーザー援用をした配線の抵抗値は、実測値で約 6 Ω / cm となった。この結果から、10 倍以上の配線抵抗の改善となった。

このことは、配線幅 10 μm の配線を描画する場合、これまでのインクジェット技術による配線描画では、レーザー援用インクジェット技術で描画した配線と同様の配線抵抗を得るには、単純計算で 13 回以上の重ね塗りが必要となることを意味しており、レーザー援用によってスループットが大幅に改善される可能性が示された。

さらに、これまでは重ね塗りのために高い位置決め精度や着弾精度が要求されたが、レーザー援用法ではこれらの課題も解消される可能性が示された。

4.2 配線の電気特性

次に、IC チップの引き出し配線を具体的な対象として、レーザー援用インクジェット技術を表面実装技術として展開するために、描画配線の高周波伝送線路としての特性を検討した。配線の高周波伝送特性は、配線の断面形状やパターン精度に大きく影響を受けることから、中心導体と

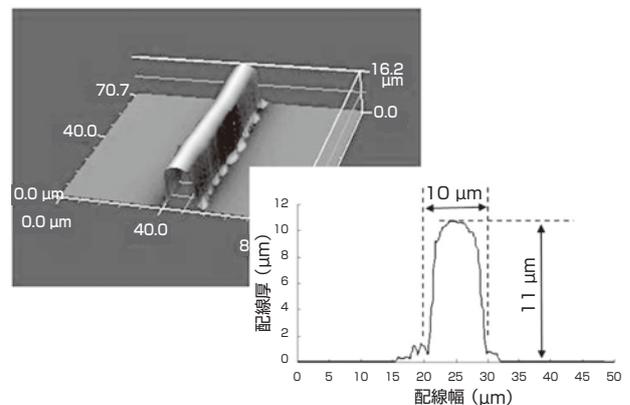


図8 レーザー援用インクジェット技術による描画配線の 3 次元形状と断面図

接地導体が同一平面内に配置しているコプレナ伝送線路のパターンをレーザー援用インクジェット技術のみでパターンニングし、高周波伝送特性の測定を行なった。

ネットワークアナライザによるTRL (Thru-Reflect-Line) 校正法による高周波数領域で伝送特性 (S21) と反射特性 (S11) のパラメータ測定によって、伝送線路やパッケージを考慮した場合、どの程度の周波数まで使用可能かを正確に把握することができる。

配線の比抵抗値を $3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 、長さ 4 mm、配線幅 30 μm 程度の矩形形状の配線と設定して 1 GHz - 40 GHz までの高周波伝送特性のシミュレーションを行った結果と実験結果を併せて図 9 に示す。これまでのインクジェット法による配線は、ドット様の配線形状を持ち、配線の高周波伝送が困難であったが、レーザー援用インクジェット技術による配線では、理論計算値と実測値がよく一致しており、高周波伝送が可能な配線が実現されていることがわかる。

また、S11 の結果から、周波数が高くなるにつれて、計算値と実験値で利得の若干の隔たりが見られるが、これは、レーザー援用インクジェット技術で作製したコプレナ伝送線路パターンでの配線側面部分の乱れが、電磁界のインピーダンス整合に影響を与えているものと推察される。一方、S21 の結果から、レーザー援用インクジェット技術による描画配線は、40 GHz までの信号を送ることが可能であり、10 GHz 程度までは減衰が少ないことから、良好な伝送特性が得られていることがわかった。

以上の結果から、10 GHz 程度の高周波領域であれば、レーザー援用インクジェット技術によって、3次元実装におけるチップ間接続やワイヤボンディングで困難とされていた高速伝送実現の可能性が示された。

4.3 段差乗り越え

レーザー援用インクジェット技術の凹凸面への描画の適用可能性と、粗面基板上のインクの濡れ拡がりの抑制効果

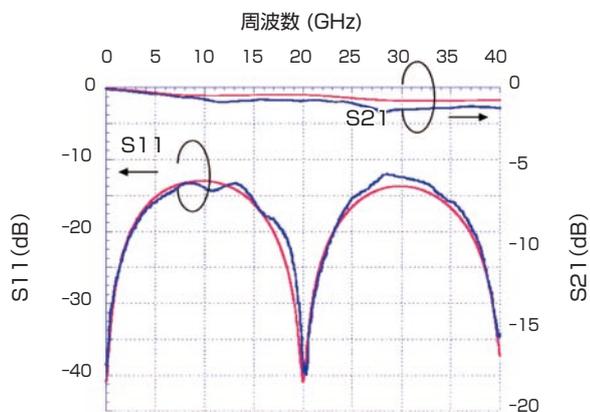


図 9 描画配線の高周波伝送特性 (< 40 GHz、青：実測値、ピンク：理論計算値)

の 2 点を確認するため、深さ 200 μm 程度の凹型に研磨したガラス基板上に配線を描画した。段差・粗面基板上で描画された配線パターンの電子顕微鏡像を図 10 に示す。レーザー援用をしない場合、基板表面粗さが大きいと、基板表面の微細凹凸の面内方向の毛細管力により、描画パターンは著しく広がっており、研磨溝の両端で配線抵抗を測定したが、導通が確認できなかった。

一方、レーザー援用を行った場合では、基板表面粗さの影響を受けず、段差部でも同様な配線幅で描画されており、研磨溝の両端で配線抵抗を測定したところ導通が確認された。以上の結果から、レーザー援用インクジェット技術が、IC チップ間接続において、バンパや微細貫通ビアを用いない側面接続や濡れ性が異なる基板間の配線へ適用可能であることが示された。

4.4 粗面基板による配線の密着力の向上

レーザー援用インクジェット技術によって鏡面基板と粗面基板を用いて配線を描画し、メッキの剥離試験 (JISH8504) と同様にセロハンテープによる剥離試験により配線の密着力を確認した。図 11 に鏡面基板と粗面基板上の配線のテープ剥離試験の結果を示す。

この結果、鏡面基板上の配線は、セロテープに密着し、配線全体が基板から剥離した。一方、粗面基板上の配線は、セロテープの密着力では剥離しなかった。この結果から、基板表面に粗面加工を施せば、物理的アンカーリング効果により基板との密着力向上が可能であることが示唆された。

しかし、配線幅、厚さが数十 μm 程度の微細配線の密着性を定量的に測定する方法は確立されておらず、配線の密着強度の評価方法について新たな開発が必要である。

5 レーザー援用インクジェット技術がもたらす技術的な可能性と今後の展開

この論文では、電子デバイスの多品種変量生産における配線工程においてレーザー援用インクジェット技術によってこれまでのインクジェット印刷技術では困難とされていた課題を解決する可能性を示した。

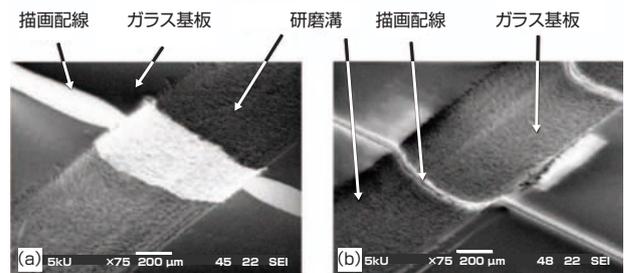


図 10 段差乗り越えと粗面基板上への配線 (a) レーザー援用なし (b) レーザー援用あり

インクの濡れ広がりを抑制する技術課題を設定して解決することにより、インクジェット印刷技術のスループットの向上と低配線抵抗化を実現できること、レーザー援用インクジェット技術によってインクの濡れ広がりが抑制され、3次元実装に必要である高周波伝送への対応や非平面基板上の配線描画、さらにはフレキシブルな基板への配線描画技術としての可能性をもつことを示した。

このような、レーザー援用インクジェット技術が実装技術に及ぼす位置付けと可能性は以下のとおりである。

- ①ICチップの高周波化：高周波伝送線路の作製と1 GHz-40 GHzの良好な高周波特性
 - ・素子間配線の短距離化をせずに高周波伝送できる可能性
- ②3次元配線技術：凹凸段差かつ粗面基板上への配線が可能
 - ・フリップチップ実装のみではなく電気的な接続の簡易化
- ③配線の耐久性：配線の密着強度の向上
 - ・耐環境性が求められるデバイスの配線への適応性

この結果を足掛かりとして実用的な3次元実装技術として確立するためには、まだ多くの技術課題を解決する必要がある。その基盤となるレーザー援用インクジェット法の基礎メカニズムや、配線を高アスペクト化する現象の解明も重要である。

すなわち、今後は、第2種基礎研究を入口として、第1種基礎研究と製品化研究への両面展開を図っていく必要があると考えている。

この論文で示した、液滴直径以下の配線幅をもつ配線が形成されるメカニズムや配線の高アスペクト化が実現される現象はまだその原理が解明されておらず、今後一層の高性能を目指すためには現象解明を目指す基礎研究、すなわち、第1種基礎研究が必要である。

一方、実用化までの時間を大きく短縮するために、インクジェット印刷技術の不得手とする分野である生産効率の

向上を開発課題の中心として、多機能化や歩留まりの向上を目指した技術開発は、製品化研究と位置づけられる。

生産効率の向上のための技術課題としては、マルチノズル化やポストアニール処理技術の高度化等があり、また多機能化の技術課題としては、機能性インクの開発や各種基板材料への適応性把握、描画条件の制御技術等が挙げられる。

このように、研究開発の進展に伴って、第1種基礎研究から製品化に至るまで技術開発課題は多様化していく。当然ながら、産総研のような単独の研究機関のみで実用化技術として進めるには、人的資源や資金面でも限界がある。第2種基礎研究で取り組んだ研究結果の技術コンセプトを効果的にアピールし、さまざまな分野の研究者や技術者の集積を図って産学官連携を進めていくことが必須である。

そして、このような研究開発の展開を通じてレーザー援用インクジェット技術を実用化の方向に進め、ミニマルマニュファクチャリングを実現するための基盤技術として確立していきたいと考えている。

6 まとめと将来展望

この論文では、インクジェット印刷技術による配線技術を発展させ、実用的な多品種変量生産方式のための基盤技術となる可能性をもつ、レーザー援用インクジェット技術の研究開発の過程を報告した。他の実用化されている配線技術と比較し、多品種変量生産のための課題抽出と解決手段を選択する過程と、それに伴う研究結果とその結果の位置付けについてとりまとめ、今後重要となる課題や進めていく技術展開の流れについて記載した。

今後は、さらに、多機能化の開発を進めて、ユーザーの欲しい機能を即座に提供するカスタムメイド生産に繋げていき、これまでの市場の拡大や新しい機能をもった電子機器新規市場の創出につなげていきたい。また、レーザー援用インクジェット技術のスループットをさらに向上させ、これまでのインクジェット印刷技術では不可能であった大面積デバイスに対応できる技術として発展させていく予定である。

謝辞

この研究の成果は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「高集積・複合 MEMS 製造技術開発事業 MEMS-半導体横方向配線技術 (高密度な低温積層一体化実装技術)」(2006 年度～2008 年度)によって得られたものであり、研究を進めるにあたり材料の評価に協力していただいた産総研先進製造プロセス研究部門の朴盈珪氏と電気特性の評価に協力していただいた津田弘樹氏に謝意を表します。

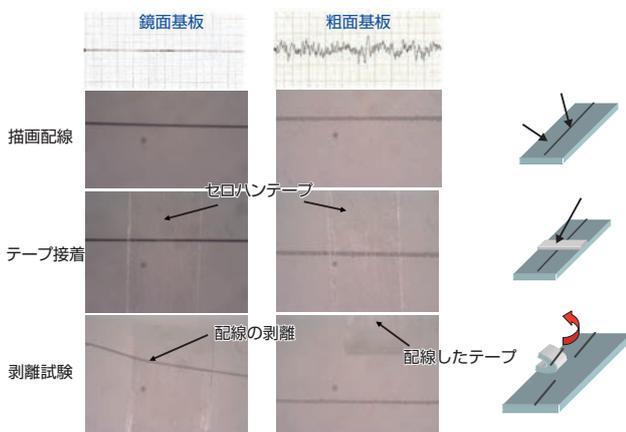


図 11 鏡面基板と粗面基板上の配線のテープ剥離試験

参考文献

[1] 明渡純, 中野禪, 朴載赫, 馬場創, 芦田極: エアロゾルデポジション法-高機能部品の低コスト化, 省エネ製造への取り組み-, *Synthesiology*, 1 (2), 130-138 (2008).

[2] 菅沼克昭, 棚網宏: プリンテッド・エレクトロニクス技術, 工業調査会 (2009).

[3] J. Kolbe, A. Arp, F. Calderone, E. M. Meyer, W. Meyer, H. Schaefer and M. Stuve: Inkjettable conductive adhesive for use in microelectronics and microsystems technology, *Microelectronics Reliability*, 47, 331-334 (2007).

[4] (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構: 精密部材成形用材料創製・加工プロセス技術に関する調査成果報告書 (2005).

[5] H. Siringhaus, T. Kawase, R. H. Friend, T. Shimoda, M. Inbasekaran, W. Wu and E. P. Woo.: High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits, *Science*, 290 (5499), 2123-2126 (2000).

[6] P. J. Smith, D.-Y. Shin, J. E. Stringer, B. Derby and N. Reis: Direct ink-jet printing and low temperature conversion of conductive silver patterns, *J. Mater. Sci.*, 41, 4153-4158 (2006).

[7] 高橋恭介: インクジェットプリンターの応用と材料II, シーエムシー出版 (2007).

[8] コニカミノルタホールディングス株式会社, 導電膜パターンおよび導電膜パターンの形成方法, 特許公開2010-182775号 (2009).

[9] 森井克行, 下田達也: インクジェット成膜-微小液滴の挙動-, *表面科学*, 24 (2), 90-97 (2003).

[10] K. Murata, J. Matsumoto, A. Tezuka, Y. Matsuba and H. Yokoyama: Super-fine ink-jet printing: toward the minimal manufacturing system, *Microsyst Technol*, 12, 2-7 (2005).

[11] R. D. Deegan, O. Bakajin, T. F. Dupont, G. Huber, S. R. Nagel and T. A. Witten: Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops, *Nature*, 389, 827-829 (1997).

[12] P. C. Duineveld: The stability of ink-jet printed lines of liquid with zero receding contact angle on a homogeneous substrate, *J. Fluid Mechanics*, 477, 175-200 (2003).

執筆者略歴

遠藤 聡人 (えんどう あきと)

2007年 桐蔭横浜大学大学院修士、博士 (工学)。大学時代には、環境応用、超音波デバイス、医用超音波診断に関わる。企業時代には、プラズマ真空装置関連の開発に従事。産総研イノベーションスクール第1期卒業生。現在は、産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門の派遣職員。博士後期課程では、水熱合成法による医療用アレイ型高周波超音波プローブの研究開発を行う。企業との共同研究を通じ、微細配線のパターンニングや電子部品の実装技術に重要性を感じ、レーザー援用インクジェット技術の開発に従事。この論文では、レーザー援用インクジェット技術による高アスペクト比配線描画技術の研究開発を担当した。



明渡 純 (あけど じゅん)

1984年 早大理工学部応用物理学科卒、1988~1991年 同理工学部助手を経て、1991年 通産省工業技術院機械技術研究所入所。現在は産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門 上席研究員。博士 (工学)。専門: 薄膜工学、微細加工、光応用計測。現在、エアロゾルデポジション法によるセラミックスインテグレーション



技術と MEMS デバイス等を研究している。2002年から5年間、NEDO ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術プロジェクトリーダー。2007年よりNEDO「高集積・複合MEMS製造技術開発事業」プロジェクトに従事、MEMS・半導体積層方向配線技術の中でレーザー援用インクジェット技術を提案、同テーマの取りまとめを担当した。

査読者との議論

議論1 全体的なコメント

コメント (長谷川 裕夫: 産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門)

開発した技術は優れたものと思いますが、シンセシオロジーの論文にふさわしいものとするために、議論2以下の点について修正をお願いします。

議論2 技術課題の明示

コメント (長谷川 裕夫)

節の題名について、克服すべき技術課題が容易に分かるように工夫してください。

回答 (遠藤 聡人)

コメントに関して、節の要約を節の題名になるように変更しました。

議論3 吐出周波数の問題解決

コメント (長谷川 裕夫)

吐出周波数の問題が提示されていますが、著者らは結局どのようにして解決したのかを記述してください。

回答 (遠藤 聡人)

これまででは、描画する配線の配線幅と抵抗を下げるために、吐出する液滴サイズを小さくし、単位長さ当たりのインク供給量を少なくする、言い換えるならばインクジェットの吐出周波数の向上を目指していました。しかし、私達は液滴径が大きくなまま小さい線幅の配線を描画することにより、単位長さ当たりのインク供給量を多くすることができることから、吐出周波数の大幅な向上をせず解決に至りました。

議論4 これまでのアプローチとの比較

コメント (長谷川 裕夫)

この研究と対比しているこれまでのアプローチについて、論理的にこれらのアプローチが適当でないことを説明し、なぜ、どのようなブレークスルーが必要だったのか、それをどのように解決したのかを明らかにしてください。高粘度のインクの問題点は簡条書きにまとめると分かり易いと思います。

回答 (遠藤 聡人)

配線のパターンを均一にし、配線の抵抗値を低減するというこれまでの取り組みとして、大きくは、以下の4方法があげられます。

- ①インクの比抵抗の低減→低抵抗化の限界
- ②高粘度インクの吐出や液滴の小径化→ノズル詰まりや吐出周波数の限界
- ③表面処理による均一なパターン形成→プロセス複雑化によるスループットの低減
- ④加熱による乾燥速度向上→急激な乾燥によって起こる突沸による配線の断線

①、②は、線幅を狭くする際に大きく影響し、③、④は、均一のパターンを描画する際に大きく影響します。また、インクジェットを実用的なプロセス技術とするためには、解決が困難となる問題も発生していました。

この4方法は、インクジェットによって吐出された液滴が着弾と同時に濡れ広がり乾燥するという工程の中で、液滴の乾燥に対する本質的な問題に取り組む方法ではありませんでした。私達は、スループットの向上という視点から、この液滴の濡れ広がりの抑制を課題に設定しました。その結果、私達は乾燥に必要な熱エネルギーをレーザー照射により局所的にインク液滴に与えるというアイデアを用いて、乾燥速度を最適化し液滴径が大きくなると吐出周波数を大幅に向上せず、液滴径以下の配線幅で高アスペクト比の配線の描画を可能にしました。

議論5 液滴サイズと配線幅の値

コメント（長谷川 裕夫）

これまでのインクジェット方式では、液滴のサイズと配線幅がどのくらいを示してください。これはこの研究で設定した開発目標と関連しますので、明確に記述してください。

回答（遠藤 聡人）

これまでの産業用インクジェット方式で用いられている液滴サイズは、直径約 15 μm (1.8 pl) - 40 μm (33.5 pl) 程度です。そのため、

配線幅は、液滴サイズより大きくなることから、約 30 μm - 50 μm 程度であり、厚みは数十 nm から数百 nm が限界とされていました。また、配線を数 μm 程度に厚くするために数十回重ね塗りをするとバルジが発生し、均一な配線の描画が困難でした。

議論6 液滴サイズの設定理由

コメント（長谷川 裕夫）

液滴サイズを設定した論理を明確に記述してください。配線幅の目標設定と仕上がったときの比抵抗の目標から、厚みの目標が決まり、供給すべき液滴サイズが決まったということでしょうか。

回答（遠藤 聡人）

液滴サイズの設定は、これまでのインクジェット技術では、液滴径 10 μm 以下の吐出が困難でした。そのため、目標とした設定値は、配線幅 10 μm 以下かつ描画速度を 1 ノズル当たり数 mm/sec から数十 mm/sec でした。目標を達成するために必要な技術課題としては、液滴の直径より小さい配線幅を描画する必要がありました。よって、液滴径を 10 μm 以上に設定しました。