

【研究論文】

【令和2年度～令和3年度 県単研究】

プリンテッドデバイス作製技術研究

小松 迅人, 天本 義己, 高田 健一
機械電子情報技術部

プリンテッドエレクトロニクスは、印刷技術を応用し様々なフィルムなどの基材に機能性インクを用いて回路、デバイス、電子構造等を形成する技術である。この技術は、フォトリソグラフィを用いた手法と比較すると工程を集約できることや回路部分等の直接描画になるので材料の低減が見込まれること、近年の機能性インクの開発やプリンテッドエレクトロニクスに適した印刷装置の開発、薄型でフレキシブルな電子機器の需要、世界的な環境負荷低減の高まりで益々注目されている¹⁾。一方、プリンテッドエレクトロニクスを検討している企業は、この技術にはノウハウが多く全体像が見え難いため、踏み出せずにいる現状がある。

そこで、本研究では、版の作製から印刷までの一貫した流れの構築、そして版の線幅寸法と印刷物の線幅寸法の誤差を低減する適切な印刷ロールの押し込み量の把握を行い、その結果として線幅が徐々に変化する回路の作製が出来たことを報告する。また、この研究を実施することで、版の作製から印刷までの一貫した作製の流れやプリンテッドデバイスの試作体験作を通して、地域企業がプリンテッドエレクトロニクス分野を検討し、展開するための情報を提供できる素地を作ることができた。

キーワード：マスクレスアライナー、Deep-RIE、反転オフセット印刷機、Agナノインク

1 緒言

近年、プリンテッドエレクトロニクスは、機能性インクやプリンテッドエレクトロニクスに適した印刷装置の開発、薄型でフレキシブルな電子機器の需要、世界的な環境負荷低減の高まりで注目されている。

プリンテッドエレクトロニクスは、印刷技術を応用して電子回路を形成する手法で、機材と機能性インクを選択が可能であるため、アイデア次第で様々な分野への展開が期待されている。また、この手法は、回路やデバイスを描画したい場所に直接印刷するので、除去加工で行う従来手法との比較では工程の集約ができることや材料低減が見込まれる。

現在、メンブレンスイッチ等の一部や太陽光パネルなどの回路形成に印刷プロセス²⁾が用いられているが、IoTセンサーや各デバイスへの作製応用には全体の流れが見え難いため、地域中小企業での検討が消極的になっていると考えられる。

本研究では、企業等から提供いただいたモチーフのデバイスを試作開発することで地域中小企業が活用する上での課題等を抽出しつつ、版作製から印刷までの一連の工程を構築し、プリンテッドエレクトロニクス分野の検討および展開に資する情報を提供できる素地を作することを目的として実施した。

2 実験方法

2.1 簡易印刷版の作製方法について

印刷版の基材は、感光性樹脂、アルミやガラスなどを用いる例が多い。一般的には、版の作製にはマスクパターンが必要になることや、これらの基材を用いて版を作製するには時間がかかるため、比較的早く形成できる印刷手法を用いて試作するメリットが出せない課題のひとつと考える。そこで、シリコンウエハを用いた簡易版の作製手法を検討することにより、デバイス試作として印刷手法を用いる利便性の向上の検証を、下記の手順で行った。

- ① 回路設計パターン作製: Layout Editorを用いて作図・編集、ポリゴン化を行いGDS II データへ変換
- ② シリコンウエハにフォトレジスト塗布しプリベーク
- ③ マスクレス転写: マスクレスアライナーを用いたシリコンウエハへの直接描画
- ④ 現像およびポストベーク
- ⑤ エッチング: Deep-RIEによる深掘りエッチング³⁾
- ⑥ 残膜処理: 酸素プラズマ

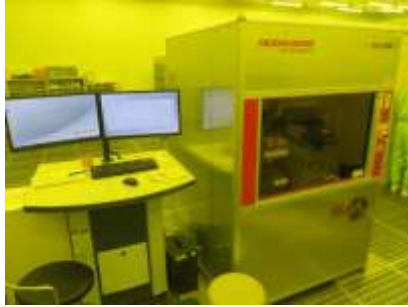


図1 マスクレスアライナー MLA150
(ハイデンベルグ・イントルメンツ社製)

2.2 反転オフセット印刷

プリントドエレクトロニクスを適用する回路の一例として、透明の基材等を使用して光の透過性を高めるアプリケーションでは、その視認性の要求からミクロンレベルの微細な線幅が求められている⁴⁾。

そこで、ミクロンレベルの線幅の印刷が可能な、反転オフセット印刷機(図2)を用いて転写スピードによる精度の検証を行った。

反転オフセット印刷法の工程を図2に示す⁵⁾。



図2 反転オフセット印刷機の印刷工程の概要

3 実験結果及び考察

3.1 簡易印刷版の作成

10mm角の範囲に5 μ mのラインアンドスペースの直線状のパターンをシリコンウエハ上に36個配置したサンプル(図3)を試作した。ここでは、①から⑥までの工程を通して1時間程度で簡易版が作製できた。

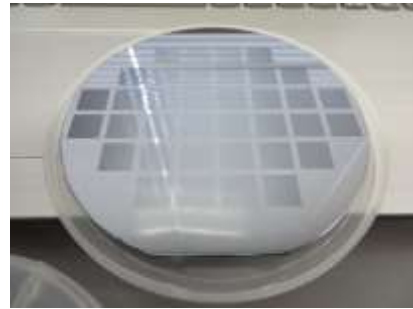


図3 シリコンウエハ上に配置されたパターン

3.2 dxf形式データサンプル回路パターンの編集

次の検討では、企業からdxf形式のサンプル回路パターンデータを提供いただき反転オフセット印刷用の版を作製した。dxfデータを、LayoutEditorで開くとデータ変換の問題から曲線部で欠損や破線する例が見られた(図4)。マスクレスアライナー用に各オブジェクトが閉じたポリゴン形式のGDS IIデータにする必要があるため、破線化した部分(図4)を中心に修正および再設計を行った。修正後の回路パターンの全体像を図5に示す。

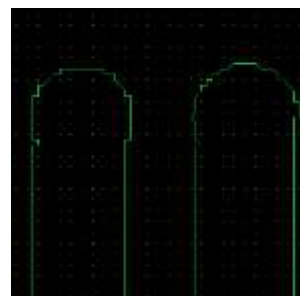


図4 細線パターンが破線した一例

3.3 サンプル回路パターンの版作製について

修正および再設計しポリゴン化したマスクレスアライナー描画用のデータは、4インチウエハに4個の配置が出来るように並べて作成し、フォトレジストを塗布したシリコンウエハにマスクレスアライナーを用いて描画を行っ

た。図6にRIEエッチング処理を行ったシリコンウエハの写真を示す。

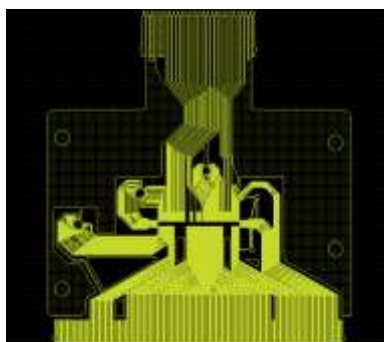


図 5 編集後のサンプル回路パターン



図 6 エッチングしたシリコンウエハ

ここでは、 $5\mu\text{m}$ で設計した線幅部は、エッチングしたシリコンウエハの同じ線幅部を共焦点顕微鏡で計測した結果 $4.81\mu\text{m}$ (4箇所計測の平均)であった。

3.4 反転オフセット印刷機の転写速度による転写状態の傾向把握

反転オフセット印刷機には、インク塗布速度、インクなじみ時間、印刷ロールの回転速度、印刷ロールの水平方向移動速度、印刷ロールの押込み量のようなパラメータがある³⁾。転写速度と押込み量の変更に絞る転写状態の傾向を把握した。



Agナノインクはフューチャーインク社製の(F-nano R0100GE)を用いた。転写パターンは、基本パターンとして作製した $10\mu\text{m}$ の線幅のサンプル形状の版を用い、反転オフセット印刷機の転写精度の傾向を把握するために、転写速度を変化させた(表1)。

転写速度を比較すると、速度が 1mm/s で印刷されたサンプルでは剥離が見られた。これは、基材に転写される前にインクが乾燥し、ブランケット側に一部残ってしまったことからインクが定着しなかったものと推測する。

一方、転写速度が 14mm/s の場合は形状が剥離無く転写されていた。以上の結果から転写速度が遅いとイ

ンクの乾燥のためブランケット側から基材に印刷が適切に出来ない傾向が見られた。

表 1 転写速度のみ変化させた場合のそれぞれの状態



転写速度	印刷されたサンプル
1mm/s	
14mm/s	

3.5 反転オフセット印刷機の押込み量が転写状態へ与える影響

半乾燥状態のインクが適切に基材に付着させるためには、適切な押込み量が必要であると考えます。

転写速度を 7mm/s の状態、基材に転写する際の押込み量を変化させ、印刷状態を観察した(表2)。

表 2 押込み量のみ変化させた場合のそれぞれの状態

押込み量(μm)	印刷されたサンプル
0(基準)	
-10	

基準とした押込み量より $10\mu\text{m}$ 上方に変化させたサンプルの状態を見ると正確に転写されていることが確認出来た。基準の押込み量で印刷されたサンプルは、端面に剥離が見られた。これはインクの受け渡しが行われるソフトタッチの状態を超えたことから起こると推測する⁶⁾。

3.6 サンプル回路パターンの版の押込み量と印刷精度の傾向

印刷ロールのZ位置が $-10\mu\text{m}$ の違いで印刷の精度が変わるため、押込み量と印刷された $5\mu\text{m}$ の線幅部で変化の傾向を見た。ワークが変化すると3.5で論じた押込み量は使用できなかった。

ワーク接触位置から150 μm の押込み量では形状が潰れてしまい、10 μm ではインクの付着が所々であったため、形状の転写が出来ている25 μm 、50 μm 、100 μm の押込み量に絞り検討することにした。

ワーク接触位置から25 μm 、50 μm 、100 μm とインクが塗布されたブランケットが設置してある印刷ロールをシリコンウエハおよびガラス基材に押し込んだ際に、ガラス基材に印刷された線幅は50 μm の押込み量の時に精度良く印刷が行われていた。

図7のグラフは、シリコンウエハの4.81 μm (4箇所計測の平均)線幅部と印刷された線幅部を共焦点顕微鏡で測定し、押込み量と版の線幅と印刷線幅との差を4箇所計測し平均しグラフにしたものである。

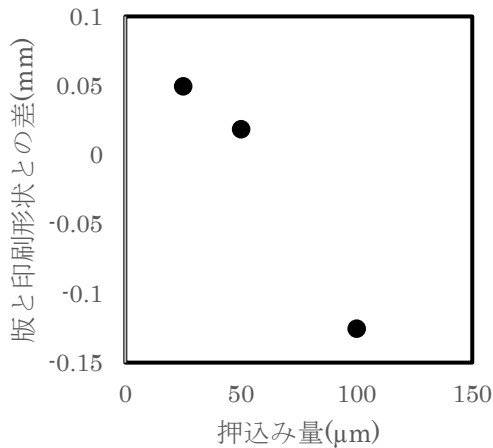


図7 印刷精度と押込み量の関係

3.7 サンプル回路パターンの印刷

印刷精度と押込み量の関係から、版の線幅と印刷された線幅が近い値を示している押込み量でサンプルの印刷を転写速度 7mm/s で行った。

サンプル回路パターンで線幅が徐々に変化する部分および曲線部の印刷が精度良く印刷されていることが見られた(図8, 図9)。

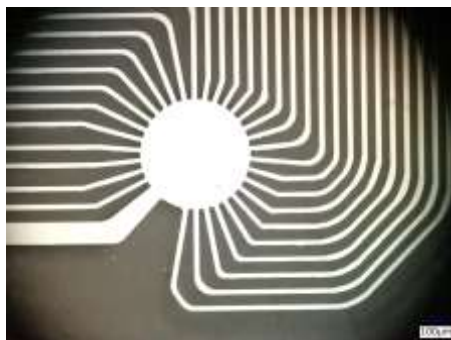


図8 サンプル回路のパターン1



図9 サンプル回路のパターン2

3.8 考察

今回の実験では、押込み量の調整により小面積では印刷の精度の向上が見られた。大面積では、押込み量のアプローチだけでは印刷精度の向上は難しいと推測され、ワーク接触位置の制御を正確に調整できる機構の検討が必要になると考えられる。

4 結言

本研究により簡易印刷版をシリコンウエハで作製するプロセスの開発と反転オフセット印刷機の転写精度の向上に関する条件調整により線幅が徐々に変化する回路の作製が出来た。

簡易印刷版の作製手法の確立には、東北大学マイクロシステム融合研究開発センターのマスクレスアライナー、Deep-RIEを使用し、印刷条件検討には、山形大学有機エレクトロニクス研究センターの反転オフセット印刷機およびAgナノインク(株式会社フューチャーインク社製)を使用し、下記の流れで、簡易印刷版の作製手法の確立および印刷条件検討実験を行った。版の作製から印刷までの一貫した流れの構築および版の線幅寸法と印刷物の線幅寸法の誤差を低減する適切な印刷ロールの押込み量の把握を行い線幅が徐々に変化する回路の作成が可能となった。

- (1) 簡易印刷版の作製プロセス開発
- (2) 高精度反転オフセット印刷機の操作方法確認
- (3) 転写スピードおよび押込み量による転写状態の傾向把握
- (4) 押込み量と印刷精度の関係把握
- (5) 回路データサンプルの印刷結果の確認

電子デバイス用の回路作製について印刷手法を通して簡易版の作製から印刷までの確認ができた。印刷手

法に適したデバイス作製が一般的になっていく可能性を秘めていることが予想できた。

謝辞

本研究を進めるにあたり山形大学有機エレクトロニクス研究センター時任静士卓越研究教授および竹田泰典助教、東北大学マイクロシステム融合研究開発センター戸津健太郎副センター長および中尾正史講師には多大なるご協力を頂きました。また、株式会社丸和製作所の住吉幸雄常務取締役には、サンプルデータの提供をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 時任静士:フレキシブル印刷有機エレクトロニクスの進展開.日本印刷学会誌第56巻第3号別刷
- 2) 竹田泰典:印刷法を用いた有機集積回路の作製プロセスの開発と性能評価.電子情報通信学会論文誌 C Vol.J103-C No.3 114-119(2020)
- 3) 森山雅昭: シリコン深掘りエッチング (Deep RIE) における超精密形状制御
<https://www.nanonet.go.jp/magazine/feature/outstanding-staff/1.html>
- 4) 牛島 洋史, 日下 靖之, 野村 健一, 藤田 真理子, 後藤 理恵, 山本 典孝, 安部 浩司: プリンテッドエレクトロニクスのための高精度印刷.第25回マイクロエレクトロニクスシンポジウム p. 193-196
- 5) Kenjiro Fukuda, Yudai Yoshimura, Tomoko Okamoto, Ysunori Takeda , Daisuke Kumaki , Yoshinori Katayama and Shizuo Tokito : Reserve-Offset Printing Optimized for Scalable Organic Thin-Film Transistor with Submicrometer Channel Length Advance Electronic Materials,1,201400145(2015)
- 6) Yasuyuki Kusaka , Ken-ichi Nomura , Nobuko Fukuda and Hirobumi Ushijima : Microcontact Patterning of Conductive Silver Lines by Contact Inking and its Layer-Transfer Mechanisms. J.Micromech.Microeng.25(2015) 055022(9pp)