

プリンテッドエレクトロニクスの最新技術

◆プリンテッドエレクトロニクスでの高精細化の取り組み

エレクトロニクスの回路やデバイスを印刷により製造する方法は、プリンテッドエレクトロニクス (PE) として知られている。印刷法の課題の一つは、いかにミクロン以下 (サブミクロン) の高精細なパターンを印刷するかにある。

インクジェット法 (IJ) は、液滴の大きさを極力小さくすることでパターン幅を細くすることは可能だ。産業技術総合研究所 (産総研) では10年以上前に、スーパーインクジェット法を開発している。基材の工夫もあり、高精細パターンの形成に成功しているが、生産性が悪いこともあり、普及には至っていない。

今年に入り、産総研から2件の注目すべき発表があった。一つは2016年5月に発表されたスーパーナップ法 (SuPR-Nap ; Surface Photo Reactive Nanometal Printing、表面光反射性ナノメタル印刷) だ。まず基材表面にフッ素ポリマーをコートする。フッ素ポリマー表面は撥油性を示しインクが乗らない。しかしパターンマスクを使用して波長172nmの紫外線で光照射すると、光が当たった部分にカルボキシル基を生成する。そこに田中貴金属が開発したAgペーストを印刷すると、露光部のカルボキシル基とインク成分が反応し、その部分だけにインクが乗るといったものだ。この方法により0.8 μ mのパターン形成が可能だ。

もう一つは16年7月に発表された毛細管現象を使用した、高精細、厚膜印刷の技術だ。まず基材表面に樹脂をコートし、ナノインプリント技術を使用して微細な凹パターンを形成する。そこにスクリーン印刷法で印刷すると、凹部には毛細管現象でインクが入り込む。深いパターンを作れば高アスペクト比のパターン形成が可能だ。また毛細管現象なので多少のマスクずれにも対応できる。

これらの方法では、印刷でサブミクロンパターン形成が可能になり技術的には非常に興味深い。が、マスク露光やナノインプリントによるひと手間が必要だ。工程が長くなり印刷法の長所が損なわれることにもなりかねないし、インプリントの母材は極めて高価だ。実用化には、コストダウンの検討は当然だが、ある程度コストをかけても見合うだけの高付加価値用途をいかに見つけるかも必要だ。印刷法にはこのような課題はあるが、近年応用が広がってきている。

◆印刷による電子デバイス製造方法が身近になってきた

現在のエレクトロニクスでは、プリント配線板（PWB）は銅張積層板に印刷やフォトリソグラフィ法でレジストパターンを形成し、露出した銅を薬液で溶解除去して製造する方法が一般的だ。また半導体製造も主にフォト法が使用される。しかし露光には高価な装置とマスクが必要だ。工程も長く、期間も長い。このような課題を解決する手段として、回路や半導体などを、紙に印刷するように簡便に製造しようという工法、PEが検討されてきた。従来この技術は主に産業用とされてきたが、最近より身近な分野にも拡大している。

16年6月、文房具販売などの内田洋行は、小中学校での理科実験において導電性マーカーペンにより紙の上にあたかもマジックで書くようにすれば、導電性回路を作ることができる、ペンなどの実験キットを販売した。マーカーペンは東大発のベンチャー企業であるAgIC（エージック）株式会社が開発した銀ベースのインクを使用しており、速乾性であるため安心して使用できる。AgICはその他にもインクジェットプリンタで印刷することで回路が形成できる材料を開発、販売している。プリンタ使用でさらに複雑で精細な回路形成を簡便に製造可能だ。

今後、あらゆる機器類がインターネットにつながるIoTまたはIoE（Everything）社会になることが予想されていて、それには膨大な数のセンサ（トリリオンセンサ）が必要とされている。このセンサは、目的に応じてさまざまな形状機能をもつため、いかに効率よく大量にカスタマイズ生産するかが重要だ。また、使い捨てにすることも考えられるため、安価な製造が必要で、高価なシリコンプロセスなどはとても使用できないと見られている。安価な製造プロセスとしてPEが身近になるとともに、より広い分野に拡大することが期待されている。

◆印刷法による電子デバイス製造の課題

PE技術は、導電性インクや有機半導体の印刷だけで簡単にデバイス形成ができるため製造プロセスが短く、大幅なコストダウンが可能だ。また、基材にフィルムを使用すればディスプレイなどは自由に折り曲げ、ロール状にするなど従来にはない形状により新しい価値を付与できる可能性があるため、各国で開発競争が激しい。しかし、実験用キットなどではさほど高い技術は不要だが、産業用に使用するにはさまざまな課題がある。例えば次のようなものがあげられる。

- (1) 印刷方法；スクリーン印刷、凸版、平版、凹版、インクジェットなどさまざまな方法があるが一長一短だ。印刷ずれは致命的にもなるので印刷時の位置合わせやサブミクロンなどの細線形成性も重要な課題。
- (2) 印刷インク；導電回路形成には導電性インクの開発は重要だ。印刷インクの用途は拡大し、薄膜トランジスタ（TFT）向けには有機半導体や絶縁体、有機EL用には発光材料や正孔輸送層なども開発する必要がある。一般的には有機物になるが、無機にくらべると耐久性が弱いことが多く、いかに寿命を延ばすかが重要な開発ポイントだ。また印刷するには有機物を溶剤に溶解させる必要がある。半導体では多環芳香族が一般的だが、溶かす溶剤が少ない。いかに溶ける構造にするかがポイントだ。
- (3) 基材；フレキシブル基材としてはプラスチックフィルムが良く使用される。PETフィルムは値段が安い、耐熱性が不十分だ。高耐熱性フィルムは高価などの課題がある。最近ではセルロースナノファイバー（CNF）が、再生可能なエコ材料でしかも物性も優れることから注目されている。

◆日本での開発状況、研究組合 JAPER A の成果

「次世代プリンテッドエレクトロニクス研究組合（JAPER A）」は、上記のような課題解決を目的として、11年3月にNEDOが主体となり産官学が共同でPE技術開発を行う研究組合として発足し、16年3月末まで5年間活動した。企業25社と1研究機関（産総研）が参加し、開発テーマは「高度TFTアレイ印刷製造のための材料・プロセス技術開発」と「印刷技術による高度フレキシブル電子基板の連続製造技術開発」だ（図1）。特にフィルム基材上での作製が目標だ。

開発目標の一つのTFTは表示デバイスなどに欠かせないものだ。TFTの構造を図2に示す。通常は電極や半導体はスパッタ法で薄膜を形成し、その上にレジスト形成、エッチングなど配線板と同様な方法で作られる。しかし、スパッタには高価な真空装置が必要で、プロセスも長く、また高温に晒されるためフレキシブルなフィルム基材には向いていない。これを極力印刷工程で作ろうというものだ。そのためには電極や半導体は有機物にして、溶剤に溶解させる必要がある。

TFTの画素電極は液晶や有機ELの1画素ごとに必要なものであり、そのサイズは極めて小さい。そのため高い位置合わせ精度が求められ、特に有機半導体部分

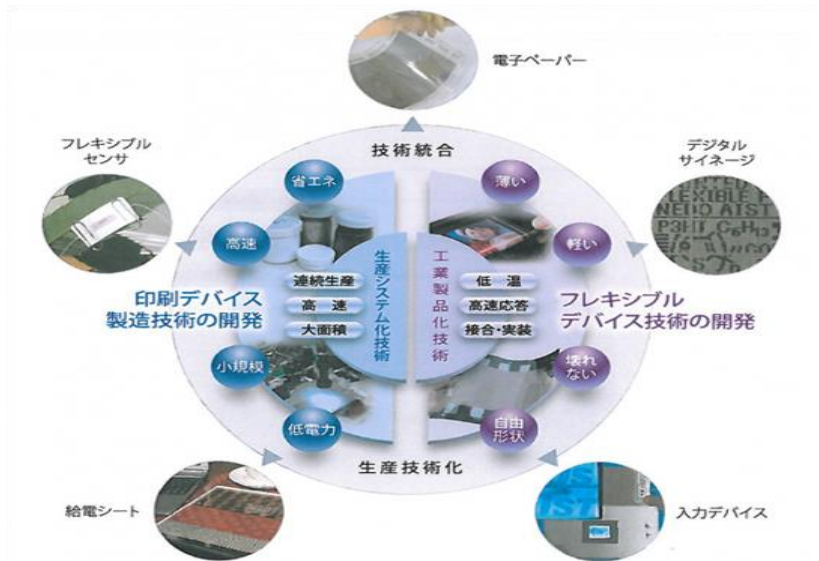


図1 JAPERの開発イメージ (JAPERのホームページより)

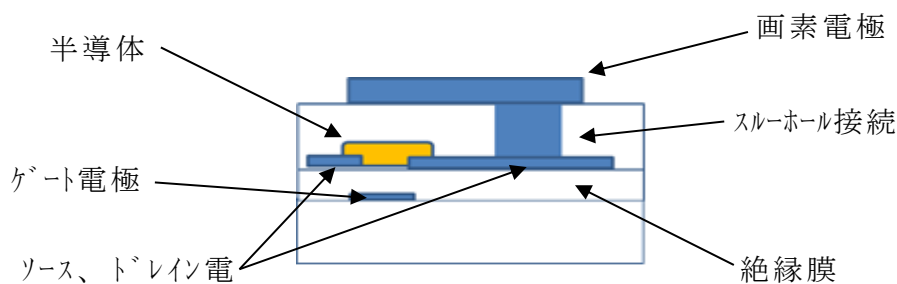


図2 TFTの一般的な構造図 (各種資料よりARC作成)

は電極にかかると動作しなくなり不良となる。基材にはフィルムが使用され、工程で熱がかかると膨張するため、極力低温プロセスで、かつ耐熱性の高いフィルムが選定された。PETよりもPENフィルムの耐熱性が高いのでよく使用される。それでも印刷ずれは避けられないので、有機TFT印刷ではインクジェット (IJ) が採用された。理由は、IJは印刷版を使用せず、印刷位置もデジタルで任意に修正が可能なためだ。一方、電極や絶縁は、生産性も考慮しスクリーン印刷法が採用された。14年にJAPERは、4サイズ上に48万個のTFTをオール印刷法で形成することに成功したと発表した。その後これらの技術によりフレキシブルな有機ELや電子ペーパー、圧力センサなどの駆動に成功している。表に用語の説明を示す。

表 用語の説明

| | |
|----------|--|
| 導体制膜 | 基材と銅箔の張り合わせ、スパッタ法(真空での薄膜形成) |
| パターン形成 | 導体制膜材にフォトリソグラフ法 → エッチング、 基材に印刷法で直接導体形成 |
| 印刷法 | スクリーン印刷法 (スーパー) インクジェット法 その他(凹版、凸版、平版など) |
| オール(全)印刷 | 併用;フォトリソグラフ法と印刷法など オール印刷;印刷のみで全工程を行う |

◆米国のフレキシブル、プリントドエレクトロニクスへの取り組み

米国ではオバマ大統領などが主導して、製造業の米国本土への回帰を目的とし「先進製造イニシアティブ」を推進している。例えば3Dプリンタなどの積層製造技術もその中の一つだが、フレキシブル、PE技術開発推進のため、15年8月、コンソーシアムFlexTechを設立された。米国防総省が主導して7,500万ドル、企業が9,000万ドル以上を負担、5年で1億7,100万ドル（約170億円）になる。参加企業は、ボーイング、モトローラ、ゼネラルモーターズ、デュポンなど米国の主要企業その他、日本からもシャープ、帝人デュポンフィルムなどが参加している。国防総省が主導しているので軍事用途開発も大きな目的と思われる。

FlexTech's View of Market Opportunities

An entirely new industry will impact many sectors
from consumer to defense and security

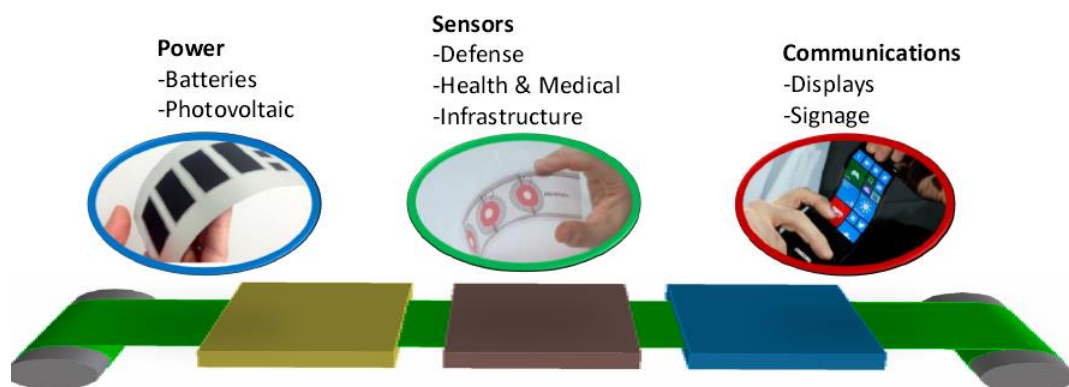


図3 FlexTechの開発イメージ（FlexTechのホームページより）

日本より約4年遅れて発足することになったが、資金力などは侮れない。半導体製造を中心としたマイクロ、ナノ製造業者の世界的交流団体であるSEMIは15年10月、FlexTechと戦略的なパートナーシップを締結し、FHE（Flexible Hybrid Electronics）分野にも注力することになったことを公表した。SEMIは日本では毎年半導体関係の展示会、セミコンを開催していることで知られる。クアルコムやヒューレットパッカードなど半導体関係の企業が参加しており、日本にはない取り組みとして注目される。ホームページには具体的な用途分野が示されている（図3）。開発アイテムは日本のJAPERとほとんど変わらないが、センサにDefense（防衛）とあるのが注目される。

◆今後の進展、JAPERは第二期に入り、各国も開発進む

JAPERは第一期では、オール印刷法による薄膜トランジスタ（TFT）を製造する技術を開発するなど、材料、装置、プロセスなどの基盤技術ができた。16年4月から2年間の第二期では、それらの技術を踏まえ、「多品種変量生産プラットフォーム」の構築を目指すとしている。実用化のためには単一品種のみ生産できる硬直したラインでは難しい。さまざまな材料、基材、工程に対応した、それぞれ柔軟性に富んだ、「フレキシブル」なラインをいかに作るかが今後の重要課題だ。

日本では他にも山形大学や東京大学などでも研究開発が進み、圧力センサを組み込んだ人工皮膚など、生体に用いるデバイス開発が盛んだ。また大阪大学や京都大学では、基材としてセルロースナノファイバー（CNF）を用いる開発を行っている。CNFは透明性が高く、強度も強く、熱膨張率も樹脂フィルムに比較して小さいなど優れた特性を持つ材料として高機能な材料開発に期待されるが、エレクトロニクス用にも期待されている。

米国もFlexTechがいよいよ3年目に入り、具体的な成果が出てくると思われる。台湾でもITRIが、ロールtoロールでの連続生産ラインを完成したという発表をした。ドイツでもフラウンホーファーなどで開発が進んでいる。どこが主導権を握るのか、いよいよ正念場になってきた。

日本は過去にはエレクトロニクス分野で先頭を走っていたが、現在は韓国や中国、台湾などの台頭で競争力が低下している。印刷は位置合わせなど繊細な技術、手先の器用さなどが要求される。日本人は、浮世絵のような版画で何枚もの多重刷り技術を完成させてきた。また、紙幣の印刷技術は世界一と言われる優れたものを持っている。ディスプレイや太陽電池などフレキシブル性が要求される分野は今後増えてくるだろう。日本はPE分野では、再び世界の先頭に立ち、他国に真似をされない高度な技術として完成させることが期待される。

それにはいかにすべきなのか。PE技術は高度な摺合せ技術が必要なので、他国では容易に真似ができないとみる人もいるが、それはやや楽観的すぎるかも知れない。半導体や液晶ディスプレイの例で明らかなように、装置、材料、人材、この3点が揃えば世界中どこでも同じものができる。グローバルな現在、装置と材料については流出を食い止めるのはなかなか難しい。技術者、開発者などの人材流出をいかに防ぐかを真剣に考えるべきだろう。

【松田英樹】