<総 説>

(受理:平成20年9月1日)

金属ナノ粒子ペーストの回路形成への応用 Metal Nanoparticle Paste and Its Application to Electronic Circuit and Packaging

松 葉 頼 重*
Yorishige MATSUBA

1. はじめに

プリントブルエレクトロニクスの基礎材料として、金属ナノ粒子を顔料とした導電性インク（ペースト）が幅広く使われるようになってきた。いろいろな印刷機器と組み合わせ、回路配線、電極形成、有機トランジスタ、あるいはマイクロ接合への応用が進みつつある。従来のフォトリソプロセスに比べ工程を簡素化でき、工法によっては廃棄物削減にも絶大な効果が期待されている。金属種としては今のところ大気焼成が可能な銀が主流であるが、銅ナノ粒子ペーストに関しても今後急ピッチに実用化が進むものと思われる。

一方、このような液体による配線技術（Liquid Wiring Technology）と親和性の高いデジタル印刷技術として、オンデマンド方式のインクジェット印刷が注目されている。インクジェット印刷ではパターンニングに必要な原版（マスク）をパソコン内でバーチャルに管理・運用できるため、最近市場ニーズの高い基板・素子のカスタム生産（多品種少量生産）において大きな利便性が得られる。また、オフコンタクト印刷の特徴を生かすことによって、凹凸のある基板上への配線形成も容易である。インクジェット工法の実装分野への応用に関してはセミナー等も盛んに開催されており、解説書もいくつか発刊されている^{1,2)}。

本稿のテーマである回路形成の範疇には導電性材料以外、抵抗体、コンデンサ、インダクタ等も当然含まれるが、ここでは弊社で開発した金属ナノ粒子ペースト“ナノペースト（NanoPaste）”のエレクトロニクス実装への応用につ

いて紹介したい。また印刷工法としては、ここ数年で大きな発展を見せているインクジェット技術を中心に解説する。

2. 金属ナノ粒子ペースト

2.1 ナノペーストの基本構成

金属ナノ粒子の製造法は物理的方法と化学的方法とに大別される。物理的方法の中で、ガス中蒸発法は量産規模への見通しが得られている技術であり、コンタミのない数nmサイズの金属ナノ粒子が得られる³⁾。一方、化学的方法には数多くのプロセスがあり、月産トンレベルの生産に適用できるものも含まれる。いずれも生成した金属ナノ粒子を粗大化させずに安定なコロイド状態に転換する技術が重要である。この点、金属錯体を前駆体とした熱分解あるいは還元による方法は、分散系の安定化と高濃度化の両面で有利であり、合金ナノ粒子への発展性も含めインク化の実用的なアプローチとして注目される⁴⁾。

松 葉 頼 重

現職：ハリマ化成株式会社 取締役
兼執行役員 筑波研究所長
株式会社SIJテクノロジー監査
役

略歴：1979年 岡山大学大学院工学
研究科修了
ハリマ化成株式会社入社
同社 中央研究所研究員
1998年 同社 筑波研究所長
2000年、金属ナノ粒子による
導電性インク「ナノペースト」
を開発。インクジェットとの
組合せによる「リキッドワイ
ヤリング工法」を提唱し、実
用化に向け奮闘中。

専門分野：コロイド化学、プロセス
工学、抽出工学
趣味：低山 & 街中徘徊

*ハリマ化成株式会社 筑波研究所
茨城県つくば市東光台 5-9-3 〒300-2635
Tsukuba Research Laboratory, Harima Chemicals, Inc.
5-9-3, Tokodai, Tsukuba, Ibaraki 300-2635, Japan

ナノペーストは粒子サイズが10nm以下の金属ナノ粒子を有機溶媒中に単分散したもので、高濃度でも分散安定性を損なわないよう、ナノ粒子表面は有機物で被覆されている⁵⁾。金属ナノ粒子は、いわゆる量子サイズ効果によって融点がバルク金属よりも低下することが知られている⁶⁾。ナノペーストの設計コンセプトにもこの考えが取り入れられており、金属種に関わらず200℃前後での焼成が可能である。しかし、金属ナノ粒子の示すこのような融点降下現象は、金属ナノ粒子の集合体からバルク構造の金属がダイレクトに生じることを保証するものではない⁷⁾。文献等で“加熱によって不安定化した分散剤が金属ナノ粒子表面から脱離し、その後は活性表面の露出した隣接するナノ粒子間で自発的に融合が進む”といった解説が散見されるが、実際の焼結プロセスはこのような単純なものではなく、有機物および金属原子の同時拡散を伴う複雑なプロセスで進行するものと考えられる。

2.2 金属ナノ粒子からのバルク構造形成

金属ナノ粒子を焼結させる最も簡便で実用的な方法は、焼成炉（オープン）による加熱である。図1に熱風循環式オープン中で加熱した場合の銀ナノペーストの比抵抗と温度との関係、並びに温度による焼結構造の違いを示す。焼成温度が高いほど比抵抗は低くなり、200℃以上では銀の

比抵抗である $1.6 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ に近い値となる。一方、焼結体の内部構造は220℃(d)では銀めっき(a)に匹敵するほど緻密であるが、200℃(c)では比抵抗は同等であるにも関わらず結晶成長がかなり抑制され、180℃(b)ではもはや砂粒を集めたような粗い構造しか得られない。このことは、ナノ粒子のバルク金属化のレベルを推し量るのに抵抗測定だけでは不十分であることを意味しており、金属ナノ粒子ペーストを配線材等に使って信頼性不足に陥る最大の要因がここにあることを忘れてはならない。

金属ナノ粒子ペーストの焼成には、装置コストおよび操作の簡便さから一般に上述のような焼成炉による加熱が用いられる。しかし、回路基板上の限られた部分に配線形成したい場合、あるいは部品実装したあとで追加的に金属ナノ粒子インクによる加工を施したい場合には、基板全体に熱負荷のかかるこの方法は合理的とはいえない。このことから、レーザーによる短時間焼成技術が検討されている。レーザーには低温焼成だけでなく、スポット径を絞ることで焼結ラインを高解像度化できるメリットもある⁸⁾。

図2は銀ナノペーストの焼成をオープン加熱とレーザー照射とで比較した外観写真である⁹⁾。表面の凹凸はインクジェットによる着弾痕であるが、レーザー焼成の方が滑らかな表面が得られている。また、焼成時間もオープンでは1時間程度を要するのに対して、レーザーの場合わずか数

図1 焼成温度の比抵抗・内部構造への影響

図2 オープン加熱とレーザー照射との比較

十秒で完結している。焼成時間がここまで短いと、レーザー機構が組み込まれた産業用インクジェット装置の開発が待たれるが、すでに YAG レーザーによる技術開発が進められている¹⁰⁾。また実用上の成果として、銀ナノペーストのレーザー焼成膜がめっき代替被膜として機能することが確認されている¹¹⁾。

レーザーも基本的には加熱方式による焼成であるが、金属ナノ粒子の分散剤をアルコールで脱着させることで、常温焼成する“化学焼結 (Chemical Sintering)”とも呼ぶべき技術が報告されている¹²⁾。この方法は耐熱性の低い PET, PEN 等の基材への配線形成に有効と考えられ、今後実用化が期待される。

3. 印刷工法

3.1 インクジェット印刷

産業用インクジェットプリンタは、待機時間を最小にして長時間にわたる印刷作業に耐えなければならない。そのため、インクジェット印刷用の顔料インクの設計においては室温での長時間にわたる安定性が要求される。プリント

ヘッドは通常マルチノズルなので、詰まったノズルのソフトウェアによるバックアップ処理も可能ではあるが、印刷速度はかなり低下することになる。ノズル閉塞は主にインク中に含まれる顔料の凝集が原因であり、ヘッド材質とインクとのマッチングが非常に重要である。

図3に配線形成用に開発されたインクジェット試験装置の外観と印刷ステージ部の写真を示す。この装置にはノズル数128のステンレス製プリントヘッドが搭載されており、100~150mm/sの非常に速い塗布速度を特徴としている。ナノペーストによる長時間塗布が可能で、本稿で示すインクジェットの印刷事例は、この装置と同じ基本構造を持つプロトタイプ機で描画されたものである。

インクジェット印刷では基材の撥液処理とステージ加熱とのバランスが重要である。図4に銀ナノペーストをポリイミドフィルム上にインクジェット塗布した際の着弾インクのドット形状を示す¹³⁾。

(a) はフッ素系の撥液剤であるノベック EGC-1720 (住友スリーエム社製) が 0.5%, (b) は 10% で表面処理した場合の結果である。ドット径および高さは撥液剤濃度によって大きく変わり、(a) で $43.7 \times 1.6 \mu\text{m}$, (b) が $36.2 \times 2.9 \mu\text{m}$ となっている。(b) の方が好ましい状態であることは言うまでもないが、あまり強めに撥液処理を施すと、焼成過程で撥液剤が完全に熱分解せずに焼成膜と基材との間に残留し、後工程で配線が剥離する等の問題を生じることがある。

配線形成においてはマイクロバジの発生を防ぐため、塗布のアルゴリズムにも留意しなければならない。具体的方法として、画像データ (ビットマップ) を分割して塗布し、最終的に均質な仕上がりとするような工夫がとられる。このような印刷条件の調整によって、一般の産業用ヘッドでも $30 \sim 50 \mu\text{m}$ レベルの解像度が得られる。焼成後の膜厚は1回塗りで $3 \mu\text{m}$ 程度であるが、重ね塗りによって $10 \mu\text{m}$ 程度まで厚くすることも可能である。

図5にガラス基板上に銀ナノペーストをインクジェット

図3 配線用インクジェット装置 (ピーエムティー社製)

図4 インクジェット着弾径への撥液剤の効果

インク:銀ナノペースト 基材:ガラス
焼成:200°C, 1hr

図5 撥液処理と基板加熱を併用した高精細印刷

塗布して形成した配線パターンを示す。着弾痕は上述の撥液処理と塗布アルゴリズムの最適化によって、まったく目立たないレベルまで抑制されている。また、サテライト滴の発生による配線間の汚染もなく、約50μm幅の均質な配線が得られている。

インクジェットを実装用途で使う場合、相手となる基材は平滑な表面を持つ紙やフィルムとは限らず、極端なケースでは事前に部品が搭載された基板であることも想定しなければならない。すなわち、プリントヘッドを基板から上方にかなり離れた状態でも正確な印刷ができる必要がある。

図6にノズル先端と基板とのギャップによる影響を示す。通常インクジェット印刷では1mm以下のギャップがとられるが、銀ナノペーストを用いたこの実験では4mm程度まで開いても印刷パターンの乱れはほとんど観測されなかった。これは、銀ナノペーストの密度が高く飛翔の直進性がよいこと、ノズル開口部とインクとの濡れ性が一定に保たれていること、およびヘッドの駆動条件（波形等）が適正であることが寄与している。凹凸のある基板表面への自由な描画を可能にするこの結果は、インクジェット工法の適用領域を広げるものである。

図6 インクジェット印刷時のギャップの影響

3.2 スクリーン印刷およびフレキシ印刷

スクリーン印刷はソルダペースト、レジストインク、導電性ペーストなどの塗布工程で実績のある汎用性の高い印刷工法である¹⁴⁾。ナノペーストの印刷にも同様に利用でき、特にフレキシブル基板に対してはロールツーロール方式による大量処理にも対応可能である。通常の導電性ペースト

インク:銀ナノペースト
基材:ポリイミドフィルム
焼成:230°C, 1hr

図7 スクリーン印刷の描画品質

ではフィラーである金属粒子の粒径による制限から解像度に限界があるが、ナノペーストでは染料インクと同じ扱いが可能であり、より高精細な印刷に用いることができる。

図7に銀ナノペーストのポリイミドフィルム上へのスクリーン印刷結果を示す（焼成温度230°C）。印刷版をうまく管理することによって、ここに示すように20/20μmのライン/スペースにまで対応可能である。ただし写真からは判別し難いが、印刷版の紗の影響が多少なりとも出てくる問題は避け難い。ナノペーストを用いたスクリーン印刷の事例としては、ウェハレベルパッケージ（WLP）の再配線、タッチパネルの電極形成等への適用実績がある。

図8にフレキシ印刷の結果を示す。解像度としてはスクリーン印刷を上回るものがあるが、塗布厚を稼ぐことができず、しかも表面はレベリングせずに荒れた状態となっている。金属ナノ粒子の分散インクはレオロジーコントロールの調整幅が狭いため、転写性に優れたペーストの設計にはかなりの工夫が必要である。

印刷ライン

表面状態

インク:銀ナノペースト
基材:ポリイミドフィルム
焼成:230°C, 1hr

図8 フレキシ印刷の描画品質

4. 応用事例

4.1 回路基板およびシステム・イン・パッケージ（SiP）への応用

産業用のインクジェット装置とナノペーストによる応用

図9 FM ラジオの試作

事例を紹介したい。図9に示したのはポリイミドフィルム上に銀ナノペーストを用いて配線形成し、ICチップと周辺部品を搭載してフレキシブルなFMラジオを試作した例である。湾曲したガラス面に貼り付けてもこのラジオは正常に動作し、各種モバイル機器においてデッドスペースとなっているケース内面（曲面である場合が多い）の機能化に利用できそうである。もちろん、凹凸の少ない面であれば、基板の貼り付けなしに直接ケース内に配線形成することも可能と思われる。

単層から多層化への試みとしては、銀ナノペーストを用いてフレキシブルな5層ビルドアップ基板の試作に成功している¹⁵⁾。図10にこの基板の外観と配線部の写真を示す。

絶縁層は液状のポリイミド樹脂をベタ印刷後に加熱硬化させて形成しており、第1層は剥離剤で前処理したガラス基板上に作製した。層間導通のためにレーザービア加工を施し、このビア部にも銀ナノペーストをインクジェットで埋め込んでいる。その結果、配線部 $5\mu\text{m}$ 、絶縁層 $15\mu\text{m}$ 、基板全体の厚みとしては $100\mu\text{m}$ に満たない超薄型基板を実現している。この基板は高温高湿試験において、配線層内および上下層間での十分な絶縁性が確認されている。

次に、プログラム実装コンソーシアムの成果として、部品内蔵型 SiP を試作し、LED ドライバーとして動作させることができた¹⁶⁾。

図11に示すように、LED 駆動制御用の IC3 個、チップコンデンサ 10 個、チップ抵抗 3 個が樹脂モールドにより電極部を同一平面上に露出させる形で一体化され、電極間を銀ナノペーストによって配線する工法が用いられている。図の右下部に示すように LED の点灯が確認されており、このときの動作電流は 0.49mA 、電圧は 2.5V であった。なお、この SiP 試作では上述の 5 層基板の場合と異なり、絶縁層もインクジェットで形成しているのが特徴である。

同様の方法で、さらに高密度の SiP (RF モジュール) を試作した事例を紹介したい¹³⁾。工法としては配線形成の全工程にインクジェットが使われたわけではないが、埋め込み型のコア IC に加えて 21 個もの受動部品が実装されており、パッド数は実に 102 に及ぶ。図12に基板裏面から見た配線部並びに部品実装後の外観を示す。この研究は携帯電話用モジュールへのプリントブルエレクトロニクスの本格的チャレンジとして注目される。

図10 インクジェット工法で試作した5層配線基板

図11 LEDモジュールの試作

図12 インクジェットで作製された携帯電話モジュール

現在普及している MCP (マルチ・チップ・パッケージ) では、ベアチップの良品判定および組合せの自由度の問題が潜在的課題としてあり、これに替わる手段としてパッケージそのものを積層する PoP (パッケージ・オン・パッケージ) が注目されるようになってきた。PoP 構造をつくるユニークな試みとして、従来利用されていないパッケージ上面にも電極を形成し、再配線することで自由な組合せのパッケージをつくる手法が提案されている¹⁷⁾。

図13に試作サンプルを示す。ベースパッケージは13mm角で厚み0.4mm、電極数は上面106、下面220である。上面のインクジェットによる再配線には耐マイグレーション性を考慮して銅ナノペーストが用いられている。銅ナノペーストの場合、何らかの還元焼成プロセスが必要であるが、この研究では原子状水素を用いた還元炉の適用が検討されている。

4.2 接合材としての利用

接合用途では、金ナノペーストを従来の金めっき代替として用いて、ワイヤボンディングが可能であることが確認されている¹⁵⁾。現在、半導体接合においては金ワイヤボンディング接合が主流であり、半導体を接続する相手側のインターポーザには主に金めっきが施されている。この金めっきの代替として、インクジェット装置を用いて金属表面の必要箇所にのみ金ナノペーストを塗布・焼成することで、工程を大幅に簡略化でき、従来のウェットめっき工程に付随した廃液処理を不要にするなど大きなメリットが得られる。

図14に銅基板上に形成した金ナノペーストの焼成被膜上に金ワイヤボンディングをした場合の強度評価結果を示す。プル強度、シヤ強度の測定結果から、従来の電解めっきによる金被膜への接合強度と同等であることが確認された。

図 13 両面電極パッケージの試作サンプル

図 14 金ナノペースト焼成被膜への金ワイヤ接合

図 15 銀ナノペースト焼成被膜への金ワイヤ接合

同様に、銀ナノペーストを銀めっきの代替として使えることも確認されている。図 15 に示すように、銅板上に銀ナノペーストをインクジェットで塗布し、270℃で15分間焼成して接合パッドを形成した。そこに直径30 μ mの金

ワイヤを超音波接合し、ループセンターでのプル強度を測定したところ、ばらつきの少ない高強度の接合が得られた。分析したところ焼成膜の内部構造はほぼ完全なバルク構造となっており、これが銀めっきと同等の性能を与えている

図 16 銀ナノペーストによるチップ接合

ものと考えられる。

金属ナノ粒子を導電性接着剤として利用する試みもみられるようになってきた^{18,19)}。量子サイズ効果で融点降下した金属ナノ粒子を、一種の糊として接合に使おうとする考えである。実際には、ナノ粒子を覆っている有機成分の蒸散が関与するため課題点もあるが、今後はんだ接合に替わる新しい接合技術として実用化される可能性が高い。

図 16 に簡単な接合実験の事例を示す。手順としては、フラックスを塗布した銅電極上に銀ナノペーストをディスペンサで一定量供給し、その上にチップ両端面に錫めっき処理された銅電極を有する 3216 チップを搭載して、各種リフロー条件で焼成した。ダイシエータスターでシエ強度を測定したところ、室温 (20°C) ではんだ接合と同等の強度が得られ、高温 (200°C) でも強度劣化が少ないことが確認された。加熱条件はほぼ鉛フリーソルダのリフロー条件に類しており、金属ナノ粒子の有する高熱伝導性および高耐熱性を生かした高温はんだ代替の接合材として活用が期待される。

4.3 スーパーインクジェットによる特殊印刷

現在家庭用として広く普及しているピエゾ方式のインクジェットプリンタは、高精細のものでも最小滴径は 1pl (ピコリットル) が限界である。しかし、これは球換算では約 12 μm に相当し、“ピコ”という語感から連想するよりはかなり大きい。産総研で開発されたスーパーインクジェット (SIJ) 技術は fl (フェムトリットル) の吐出技術を実現し、超高精細・直接描画に向けたインクジェットのフロンティア領域を切り開きつつある²⁰⁾。

SIJ では、吐出するインク滴径が 1 μm 以下と微小であるため、インク吐出後に急速な溶剤の蒸発が起こり、着弾点では金属ナノ粒子が濃縮された高粘度液体に変化する。これによって、インクジェットの宿命であるマイクロバルジの発生は抑制され、図 17 に示すような特殊なマイクロファブリケーションが可能となる。

(a) は線幅 3 μm の微細な平面パターン、(b)~(d) はマイクロスケールの立体形成の事例である。一般のインクジェットによる立体造形では、レーザーや UV による有機モノマーの硬化システムが利用されるが、SIJ では何ら

図 17 スーパーインクジェットによる試作サンプル

の支援システムなしに、印刷だけでこのような三次元パターンの形成が可能である。(b)のマイクロバンプの場合、ピッチ $50\mu\text{m}$ 、高さ約 $15\mu\text{m}$ 、径は約 $6\mu\text{m}$ で、チップ電極をはじめ実装分野での幅広い応用が期待される。

有機トランジスタをめぐる技術はプリンタブルエレクトロニクスのハイライト部分を占めている。この分野への電界吐出型インクジェットの実用事例が報告されている²¹⁾。また、SIJによるソース・ドレインの電極形成では、その超微細印刷性を生かして、 $2\mu\text{m}$ の線幅、 $1\mu\text{m}$ のチャンネル長を実現しており、低温焼成 (130°C) と相まってペンタセン層へのダメージを極小化し、高性能有機 TFT の構造形成に大きく寄与している²²⁾。スーパーインクジェットは現状では大面積のパターン形成には向かないが、微小部分への機能形成には実用性の高い技術といえる。

5. おわりに

金属ナノ粒子については特性面もブラッシュアップされ、実用材料の域に達しつつある。この流れが引き継がれれば、エレクトロニクス実装に必要なあらゆる材料がプリンタブルなインクの対象となる。形態も液体だけでなく、トナーのような粉体、転写テープのような固体、あるいはエアロゾルのような気体状のものも予想される。インクの多様化とそれに伴う印刷技術の革新が今後どのように進むのか注目していきたい。

プリンタブルエレクトロニクスは新しいモノづくり技術への萌芽を含むものである。しかし、この概念を拡大解釈して、本来既存技術で満足すべき領域にまで立ち入ってしまうよう注意しなければならない。そこに印刷でしか実現できない何かがなければ、単に“印刷でもここまでやれた”という自己満足のな世界に終始することとなる。この分野がひとつのテクノロジー分野として確固たる地位を獲得するためには、プリンタブルの指し示す方向について深い議論を重ね、装置・材料・プロセス技術が一体となって進化していく必要がある。

引用文献

- 1) 菅沼克昭監修, “金属ナノ粒子ペーストのインクジェット微細配線”, シーエムシー出版, (2006).
- 2) Electronic Journal 別冊, “2007 インクジェット技術大全”, 電子ジャーナル, (2007).
- 3) 林主税, 上田良二, 田崎明 編, “超微粒子—創造科学技術”, 三田出版会, 115 (1988).
- 4) 中許昌美, 山本真理, 色材, **78**, 221 (2005).
- 5) 松葉頼重, エレクトロニクス実装学会誌, **6**, 130 (2003).
- 6) Ph. Buffat and J-P. Borel, *Phys. Rev. A*, **13**, 2287 (1976).
- 7) Z. Radivojevic, K. Andersson, K. Hashizume, M. Heino, M. Mäntysalo, P. Mansikkamäki, Y. Matsuba, N. Terada, *Proc. THERMINIC 2006 (Nice)*, 163 (2006).
- 8) S. H. Ko, H. Pan, C. P. Grigoropoulos, C. K. Luscombe, J. M. J. Frechet and D. Poulikakos, *Nanotechnology*, **18**, 1 (2007).
- 9) J. Pekkanen, M. Heino, P. Mansikkamäki, M. Mäntysalo and R. Rönkkä, *Abstracts of Nanotechnology in Northern Europe Congress 2007 (Helsinki)*, 78 (2005).
- 10) K. Maekawa, M. Mita, K. Yamasaki, T. Niizeki, Y. Matsuba, N. Terada and H. Saito, *Proc. ECTC 2008*, 950 (2008).
- 11) T. Niizeki, K. Maekawa, M. Mita, K. Yamasaki, Y. Matsuba, N. Terada and H. Saito, *Proc. ECTC 2008*, 1745 (2008).
- 12) D. Wakuda, M. Hatamura and K. Suganuma, *Chem. Phys. Lett.*, **441**, 305 (2007).
- 13) M. Mäntysalo, P. Mansikkamäki, J. Miettinen, K. Kaija, S. Pienimäa, R. Rönkkä, K. Hashizume, A. Kamigori, Y. Matsuba, K. Oyama, N. Terada, H. Saito, M. Kuchiki and M. Tsubouchi, *Proc. ECTC 2007*, 89 (2007).
- 14) 佐野康, “高品質スクリーン印刷ガイド”, エスピーソリューション, (2007).
- 15) 小山賢秀, 松葉頼重, エレクトロニクス実装学会誌, **9**, 538 (2006).
- 16) 小田正明, 電子材料, **44**, 55 (2005).
- 17) 石原政道, 和泉亮, エレクトロニクス実装学会誌, **10**, 403 (2007).
- 18) 廣瀬明夫, 溶接学会誌, **76**, 162 (2007).
- 19) H. Jiang, K-S Moon, F. Hua and C. P. Wong, *Chem. Mater.*, **19**, 4482 (2007).
- 20) 村田和広, エレクトロニクス実装学会誌, **7**, 487 (2004).
- 21) J-U. Park, M. Hardy, S. J. Kang, K. Barton, K. Adair, D.K. Mukhopadhyay, C.Y. Lee, M.S. Strano, A.G. Alleyne, J. G. Georgiadis, P. M. Ferreira and J. A. Rogers, *Nature Mater.*, **6**, 782 (2007).
- 22) T. Sekitani, Y. Noguchi, U. Zschieschang, H. Klauk and T. Someya, *PANS*, **105**, 4976 (2008).