

PE レポート



No.2

2010 年 9 月

プリンテッド・エレクトロニクス研究会

<http://www.eco.sanken.osaka-u.ac.jp/pe/index.html>

掲載記事などの無断転載ならびに一般公開はご遠慮下さい。

PE レポート No.2

目次

国際・国内イベントレポート

International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010 (ICSM 2010)	辛川 誠	4
SEMICON West2010/Intersolar North America に参加して (1)	菅沼 克昭	6
Printed Electronics Korea (The 1 st Printed Electronics Tech & Industry Expo)	金 昌宰	9

論文紹介

14-24

常温処理で印刷銅配線を作製	Silke Wolf <i>et al.</i> Journal of Materials Chemistry (2010)
印刷技術で作るナノポラスメンブレンフィルター	N. A. Luechinger <i>et al.</i> Chemistry of Materials (2010)
塗布法に適用可能な高性能 n 型有機電界効果トランジスタ材料	Yutaka Ie <i>et al.</i> Organic Electronics (2010)
銀ナノワイヤで透明プラフィルム表面を覆った新しい透明電極	Xiao-Yan Zeng <i>et al.</i> Advanced Materials (2010)
絶縁体/半導体ポリマーブレンド液インクジェット法を用いた有機トランジスタ	Kilwon Cho <i>et al.</i> Advanced Functional Materials (2010)
銀ナノワイヤの PDMS スタンプ転写による PET 基板透明電極	Anuj R. Madaria <i>et al.</i> Nano Research (2010)
シリカナノ粒子のバーコーター塗布による太陽電池用光吸収膜	Sangmoo Jeong <i>et al.</i> NANO Letters (2010)
フローティング機構を用いた有機トランジスタメモリ	Soo-Jin Kim <i>et al.</i> NANO Letters (2010)
水溶性ポリフルオレンを界面層として用いた有機太陽電池	Seung-Hwan Oh <i>et al.</i> Advanced Functional Materials(2010)
MOD インクを利用した UV 硬化樹脂での 3 次元微細構造パターン	Jong-Jin Park <i>et al.</i> Advanced Functional Materials (2010)
ローラーペイント法を用いた高効率ポリマー太陽電池の作製	Jae Woong Jung <i>et al.</i> Advanced Functional Materials (2010)
有機太陽電池向け金属グリッド/導電性ポリマーのハイブリッド透明導電膜	Jingyu Zou <i>et al.</i> APPLIED PHYSICS LETTERS (2010)
塗布法のみで有機トランジスタを作製	Masataka Kano <i>et al.</i> Applied Physics Express (2010)
フォトリソプロセスによりシリコン基板へ埋め込んだ伸縮性金導体	T. Adrega <i>et al.</i> Journal of Micromechanics (2010)
銀ナノワイヤを塗布したフレキシブルな透明導電膜	Liangbing Hu <i>et al.</i> ACS Nano (2010)
銀ナノペースト印刷配線の電気抵抗と高周波特性	Jong-Woong Kim <i>et al.</i> Japanese Journal of Applied Physics (2009)

UV 照射による MOD インク配線の室温焼結

Josué J. P. Valetón *Journal of Materials Chemistry* (2010)

銅有機化合物による印刷銅配線

Byoungyoon Lee *et al.* *Current Applied Physics* (2009)

インクジェット波形を調整し幅 25 μ m のラインを描画

Henning Meier *et al.* *Physica Status Solidi A* (2009)

ポリマー基板へダメージを与えないアルゴンプラズマ焼結

Ingo Reinhold *et al.* *Journal of Materials Chemistry* (2009)

シリコン結晶太陽電池の銀厚膜接点における銀結晶形成のメカニズム

Kyoung-Kook Hong *et al.* *Solar Energy Materials and Solar Cells* (2008)

空気中で安定な銅ナノ粒子インク

Norman A Luechinger *et al.* *Nanotechnology* (2008)

PE ヘッドライン No.3-5 より

25-29

これまでにメール送信した PE ヘッドライン (No.3-5) を再掲しました。

国際・国内イベントレポート

**International Conference on Science and Technology of
Synthetic Metals 2010 (ICSM 2010)**

京都国際会館 京都市

2010年7月4-9日

大阪大学産業科学研究所 ソフトナノマテリアル研究分野

辛川 誠

karakawa@sanken.osaka-u.ac.jp

今回で20回目となる ICSM2010 が7月4日～9日の6日間（4日は Registration で発表は5日から）の日程で京都市の北部に位置する京都国際会館で開催された。ICSM は、導電性高分子、電子・光電子・光・磁気応用材料、有機超電導体、フラーレン・カーボンナノチューブ・グラフェン、分子磁石・有機スピントロニクス、有機トランジスタ・単分子エレクトロニクス、有機 EL、有機太陽電池など有機材料の金属的性質に関連する科学と技術を対象とした2年毎に開催されている国際会議である。2006年はアイルランドの Dublin、2008年はブラジルの Porto de Galinhas で行われ、次回2012年はアメリカの Atlanta での開催が予定されている。

9時から17時までの口頭発表、その後19時20分までのポスター発表と過密なスケジュールの中、2000年ノーベル化学賞受賞の Alan J. Heeger 教授による Plenary lecture を含む5件の Plenary lecture、21件の Keynote lecture、70件の Invited talk、300件の口頭発表と716件のポスター発表が行われた。有機エレクトロニクス材料の中でも、とりわけ有機太陽電池用材料とそのデバイス物理に関する発表が多く、環境問題への関心の高さや政府レベルの取り組みなども相まって有機エレクトロニクス分野の主流が有機 EL、有機トランジスタ (OFET) から有機太陽電池へ移っていることを実感する。このレポートでは、プリントドエレクトロニクスによる表示デバイスを実現するにあたって重要な分野である有機 EL、OFET に関する発表を紹介する。

ディスプレイの軽量化、薄型化、フレキシブル化は、有機エレクトロニクス材料およびそれを用いたプリントドエレクトロニクス技術によってこそ実現される。このようなデバイスを実現するため、まず注目すべきは有機 EL 分野であろう。すでに実用化レベルにある材料もあり、一時期の会場を埋め尽くす聴衆を集めるほどの注目度はないが、それゆえに高効率白色発光などの新規材料や、全く新しい概念による高効率化など高いレベルの研究発表がいくつも見られた。Institute für Angewandte Photophysik (Dresden, Germany) の Karl Leo 教授は RGB すべてに燐光発光材料を使用し、それらを合わせた白色 EL 素子において $90 \text{ lm/W}@1000 \text{ cd/m}^2$ という高効率デバイスを実現したことを報告していた。昨今の有機 EL に関する文献は実用化段階であることもあり技術的な詳細が不明な場合が多いが、現在までの学術論文において効率が良いものが 44 lm/W であることを考慮すると、今回の結果はその倍以上の効率であり飛躍的な進歩と言える。これをベースに近い将来、照明分野への応用に必要とされる 100 lm/W を達成することも可能であると言う。一方、有機 EL の高効率化の新展開として九州大学の安達教授は、3重項エネルギーを利用する新しい概念について発表された。Thermally activated delayed fluorescence (TADF) を利用した新しい EL 発光機構に関するもので、

ΔE_{st} (3重項と1重項のエネルギー差)を小さくした分子を用いることで三重項エネルギーを一重項エネルギーへ変換し、蛍光として利用できるようになるという。これによってレアメタルを介した燐光を使わず、蛍光量子収率の理論限界値である25%を100%に近づけることが可能となる。TADFに基づいたデバイスにおいて、蛍光量子収率39%、 ϕ_{EL} 5.3%まで向上できることが報告された。この機構に適した分子は今後増えてくると思われ、動向に注目したい。

有機ELを表示素子とするデバイスにおいて必要なのが、OFETである。これまでフレキシブル基板を使った有機ELデバイスではシリコン半導体をトランジスタに用いて表示制御が行われてきたが、ローコスト、プリンテッドを目指す上では有機トランジスタでの駆動が理想的である。A*STAR (Singapore) の Beng. S. Ong 教授は、dithienothiophene (DTT) ユニットを組み込んだチオフェンポリマー (Mw 10200, Mn 7900) において、 $0.32 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, on/off比 10^7 という高性能なp型高分子半導体について報告していた。さらにこのポリマーをドナーとする有機薄膜太陽電池においては、エネルギー変換効率が5.05%であることも報告された。

一方、Carnegie Mellon University (Pittsburgh, USA) の T. L. Nelson 博士は、next generation transistor paint と称した高移動度で電気的特性に再現性があり、高いオンオフ特性を有する OFET 材料を提唱していた。トランジスタペイントは塗布によって作製できる高性能なトランジスタ材料と考えられ、プリンテッドエレクトロニクス概念と同義であると思われる。今回は Dithienopyrrole (DTP) と Diketopyrrolopyrrole (DPP) の共重合ポリマーで HOMO が -5.2 eV、LUMO が -4.0 eV、エネルギーギャップが 1.2 eV という材料について発表された。FETにおける移動度は平均で $0.28 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, on/off比 10^3 - 10^4 , 最高値は $0.41 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ であった。平面性の高い縮環構造でかつドナーアクセプター型の交互ポリマーとすることで狭バンドギャップを実現している。縮環構造を有する化合物につきものの溶解性の問題は DTP ユニットに Hexyloctyl 基、DPP ユニットに C_{16} の長鎖アルキルを導入することで回避している。トランジスタペイントの考え方に重要な再現性も確保された有効なポリマートランジスタ材料である。

オールプリンテッドデバイスを作製した例として、産業技術総合研究所の八瀬清志博士は、A4サイズ、200 ppi のフレキシブルデバイスを発表した。マイクロコンタクトプリントという手法で、プラスチック基板に、Ag ナノインクでゲート電極およびソースドレイン電極を形成する。最後に精度良くポリチオフェン (P3HT) 薄膜を印刷し、封止する。トランジスタ特性は平均 $10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ オーダーという。表示部はポリマーネットワーク液晶を用い、電子ペーパーのようなフレキシブルデバイスとなる。マイクロコンタクトプリントによれば、 $5 \mu\text{m}$ というフォトリソグラフィレベルのラインアンドスペースを基板に印刷によりパターンニングできる。デバイスのすべてを印刷技術により作製した世界初の例である。

最後に Abo Academi University (Finland) の D. Tobjörg 教授による再生紙を基板として用いたフレキシブルデバイスに関する報告を紹介する。再生紙の上に数層のコート層を重ねたところへ、Ag のソースドレイン電極を形成した後、P3HT をトランジスタ層として製膜し、さらに絶縁膜を積層した上に導電性高分子である PEDOT:PSS をゲート電極として OFET とする。フレキシブル基板の中でも究極的な紙を使った OFET の作製および駆動は例がなく、大変興味深い。この系における問題は紙の表面粗さにあり、いかにフラットな面を作るかが鍵だという。紙を使い、印刷でトランジスタが作られ、表示素子として機能するものができれば、それは究極的なフレキシブルデバイスと呼べるかもしれない。

国際・国内イベントレポート

SEMICON West2010/Intersolar North Americaに参加して（1）

San Francisco, United States

2010年7月12-15日

大阪大学産業科学研究所 先端実装材料研究分野

菅沼 克昭

suganuma@sanken.osaka-u.ac.jp

サンフランシスコの Moscow センターにおいて開催された SEMICON/Intersolar を紹介しよう。SEMICON は半導体や MEMS を中心にした展示会で、国内でも例年 12 月に開催されている。今回は、3 日間の会期で 15,000 人の参加を得た。同じ会場で Intersolar として太陽光発電のショーと国際会議が行われ、8000 を越えるブースが出展され 20,000 人の参加を得た。このショーの様子をこれから 2 回に分けて紹介しよう。

SEMICON West2010 に併設して開催されたシンポジウムの中に、Extreme Electronics : Flexible and Printed Electronics: Product and Supply Chain Innovation. What's now and what's next for the manufacturing of flexible displays, lighting and photovoltaic products が設けられ、6 件の講演が行われた。主催は、FlexTech Alliance であり、この組織は元々フレキシブル・ディスプレイのコンソーシアムとして設けられた USDC を母体とする北アメリカのコンソーシアムと位置づけられる。本拠はサンノゼにあり、ディスプレイ技術のみでなく、フレキシブルデバイス、PE 技術全般をカバーしている。公式 Web は、<http://www.flextech.org/> であるので、興味のある方は参照されるとよいだろう。以下に、それぞれの講演を紹介する。一部を除き発表資料は公開されているので、興味のある方は次のウェブサイトをご参照頂きたい：
http://www.semiconwest.org/SessionsEvents/ExtremeElectronics/ctr_036728。



図1 SEMICON WEST2010 で開催された Flexible and Printed Electronics セッション。

1. The Value of Printed Electronics: A Progress Report (IDTechEx、Raghu Das 氏)

IDTechEx は、英国に拠点を置く PE 技術の調査会社であり、本研究会でもしばしば引用しているので、ご存じの方も多いだろう。Das 氏の講演では PE 市場の動向と予測が為され、大面積フレ

キシブル性への要求、次いでコストとパフォーマンスへの要求が多いことが指摘された。市場製品の例として、OLED とソーラー市場の伸びの例が紹介された。2010 年のそれぞれの（潜在）市場が 9 億ドル（800 億円）、4 億ドル（340 億円）であるのが、10 年後には 190 億ドル（1 兆 6 千億円）、170 億ドル（1 兆 4 千億円）になるそうだ。

2. Printed Flexible Electronics: Display and Sensor Applications (PARC、Ana Claudia Arias 氏)

PARC は Xerox から独立した研究所で、シリコンバレーのパロアルトにある。Arias 氏の講演では、同社のインクジェット印刷を用いたバックプレーンを持つ電子ペーパー・フレキシブル・ディスプレイの試作例を紹介し、米国の雑誌に折り込みの実物を販売した実物を披露した。基板は可撓性であるが伸展性はない場合のデバイスに立体形状を与えるためには、「折り紙」法を提案した。後半では、陸軍で実用化されたセンサーテープの詳細が紹介された。これは、兵士の爆発による衝撃の記録するためのヘルメット装着センサーで、蒸着で形成した PVDF フィルムを圧力センサーとして用いて 40 イベント記録を可能とするメモリを印刷で組み込んだもので、従来のセンサーの 100 分の 1 のコストを実現したという。商品の性格から、寿命は 1 週間で設計されている。

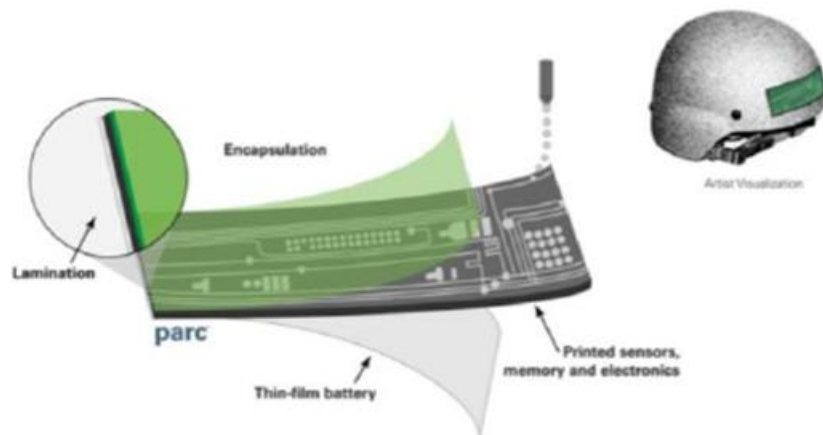


図2 PARC のヘルメットセンサ (Arias 氏発表資料より)

3. Challenges in Flexible Electronics Manufacturing (Doug Loy 氏、アリゾナ州立大 Flexible Display Center)

FDC は、アリゾナ州立大に 2004 年に設立されたフレキシブル・ディスプレイ技術開発拠点で、電子ペーパーと有機 EL のディスプレイ開発に取り組む産学コンソーシアムである。蒸着による TFT 形成が主体に取り組んでいる。基板材料の選択では、200°C までの温度サイクルを 10 回近く耐える必要があるとのことで、PEN フィルムとステンレスを基板とした試作例が紹介された。また、吸水率も PEN が PET より優れる。やはり、軍向けのデバイスの必要性から軽量さ、フレキシブルさが求められ、PEN フィルムが主体になっているという。また、プロセス中の仮止め、封止や実装のための接続技術が重要であることを強調していた。

4. Carrier Gas Enhanced Vapor Phase Deposition Equipment for Manufacturing of Organic Electronics (Christof Sommerhalter 氏、Aixtron)

この講演では、印刷ではなく蒸着法（OVPD : Organic Vapor Phase Deposition）による有機 LED 照明が紹介された。蒸着であっても 10mbar 程度の低真空で、形成する原料分子を基板にシャワーのように塗布する。プロセス温度は 150°C~300°C であり、図 3 に示すようにソースを複数準備することで 8 層程度までの多層膜の形成が可能になる。本技術は、Plastic Logic から発売される予定であった QUE のバックプレーン製造で一部用いられたそうである。また、OVPD 法のガス輸送部に熱分解室を設けることで高分子膜を形成することも可能と言う。

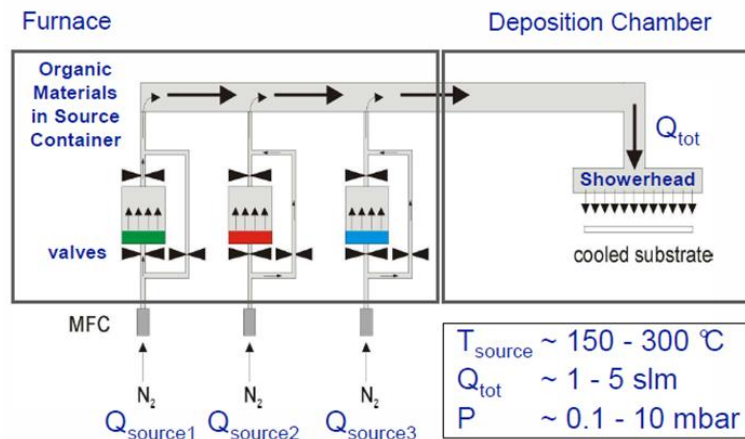


図 3 OVPD プロセスの原理（Sommerhalter 氏発表資料より）

5. Roll-to-Roll Manufacture of Flexible Electronic Devices（Neil Morrison 氏、Applied Materials）

同社の技術は、基本は蒸着法によるロール・ツー・ロール法になる。同氏の講演では、装置の概要とインライン膜圧測定法が紹介された。基板材料としての PET、PEN、PI、ステンレス鋼箔等の比較が為された。デバイス特性から基板の平滑性が望まれ、ステンレス箔より PEN や PI が望ましいことが指摘された。また、蒸着時のコンタミやアーク放電による欠陥形成や web ハンドリング時のコンタミによる欠陥形成などについて考察が為された。

6. Printed Silicon - A New Paradigm for Low-Cost Electronics（Joerg Rockenberger 氏、Kovio）

Kovio 社では、2001 年に MIT から発したベンチャー企業で、主として Si ナノ粒子インクによる印刷デバイス形成を提案している。同社の Si ナノインクは、ステンレス・シートを基板に形成するもので、移動度は 80cm²/Vs 程度が得られている。また、Si であるので、40MHz 程度までの周波数に適用可能になり、RFID 用途として期待している。ワインボトルに貼り付けた RFID 試作品が紹介された。

国際・国内イベントレポート

Printed Electronics Korea

(The 1st Printed Electronics Tech & Industry Expo)に参加にして

Goyang-si, Korea

2010年8月18-8月20日

大阪大学産業科学研究所 先端実装材料研究分野

金 昌宰 (キム チャンジェ)

cjkim@eco.sanken.osaka-u.ac.jp

2010年8月18~20日、韓国 高陽市で、第8回国際ナノテク・シンポジウム・展示会「NANO KOREA 2010」が開催された(11ヶ国 253企業が 422件の展示)。「NANO KOREA 2010」は、韓国、日本、ドイツが共催した電子印刷技術産業展「Printed Electronics Tech & Industry Expo」(以下 PE 展)、マイクロ・MEMS の展示会・会議「Micro/MEMS Exhibition & Conference」、レーザー코리아「Laser Korea」と共に開催された。PE 展は、サムソン、LG、ハンファなど 26 の企業が 45 個の展示ブースが設けられた。以下は、PE 展の参加にて興味深く感じた展示の紹介である。



図1 展示会場の様子

1. InkTec

InkTec は、韓国を代表する導電性インクの製造会社である。インクジェット印刷用インク、ナノハイブリッドペースト、コーティングインク等が展示されていた。金属塩インク(MOD インク)は、わずか 130°C~150°C で 5~10 分間の焼結を行うと、 $4.2 \mu\Omega\text{cm}$ の体積抵抗率(銀バルク体積抵抗率: $1.59 \mu\Omega\text{cm}$)が達成される。更に、配線の厚さを確保させるためのコーティング層を形成した PET 基板上に MOD インクを用いインクジェット印刷すると、約 $40 \mu\text{m}$ 線幅の配線が描画できたという。金属ナノ粒子インク(NP インク)は、MOD インクより焼結温度が高いが、300°C~350°C で 5~10 分間焼結を行うと、 $2.88 \mu\Omega\text{cm}$ というバルク銀に非常に近い体積抵抗率が達成される。上記特性を表 1 にまとめた。

コーティング用インクの場合、銀インクをスプレーまたはディッピングの方法を用い基板上に塗

布した後、わずか 120℃で 3~5 分間、焼結すると、100~150nm のコーティング層が形成される。既存のめっきや蒸着によるコーティング剤と比べると、複雑な生産プロセスの短縮が可能であるという事と、有害物質が発生しない為、環境負荷が低いという利点がある。

http://www.inktec.com/english/product_info/electronic_tec.asp

表 1 インクジェット印刷用インクの仕様

	TEC-IJ-010	TEC-IJ-030	TEC-IJ-060
銀含有量 (wt%)	15	50	12
インク形態	金属塩	金属ナノ粒子	金属塩
焼結条件	130~150℃ (5~10 分)	300~350℃ (5~10 分)	130~150℃ (5~10 分)
体積抵抗率($\mu\Omega\text{cm}$)	4.2	2.88	8.35



図 2 インクジェット印刷によって、PET 基板上に描画した配線

2. サムソン電機

サムソン電機は、電子機器の部品を生産するサムソングループの子会社である。インクジェット印刷用の導電性インクとヘッドが展示されていた。インクジェット印刷用の導電性インクは、金、銀、銅ナノ粒子インクが展示された。その中でも銅ナノ粒子インクは、200℃の焼結を行う事によって、 $3\mu\Omega\text{cm}$ という非常に優れた体積抵抗率が示された（銅バルク体積抵抗率： $1.68\mu\Omega\text{cm}$ ）。なお、焼結の時間と雰囲気は不明である。これらの金属ナノ粒子インクの特性を表 2 にまとめた。

また、サムソン電機の開発しているインクジェット印刷用のヘッドは、7~21pℓのノズルが $141\mu\text{m}$ の間隔で 512 個があり、高解像度のパターン形成が可能という特徴がある。

<http://www.sem.samsung.co.kr/index.jsp>



図 3 金、銀、銅ナノ粒子インク

表 2 インクジェット印刷用インクの仕様

	Cu40N	Ag60N	Au50N
金属	銅	銀	金
粒子径 (nm)	5~8	5~8	5~8
銀含有量 (wt%)	40	60	50
インク形態	金属ナノ粒子	金属ナノ粒子	金属ナノ粒子
焼結条件	200℃	250℃	200~250℃
体積抵抗率 ($\mu\Omega\text{cm}$)	3	3	5

3. Hanwha Chemical

ハンファケミカルは、韓国を代表する化学企業である。昨今、ナノマテリアルと次世代エネルギー分野に事業領域を広げている。さまざまな印刷方法に使用可能な導電性インクが展示されていた。インクジェット印刷用の銅ナノ粒子インク (CUNI-20CH) は、250℃で30分間焼結によって $4\mu\Omega\text{cm}$ の体積抵抗率 (銅バルク体積抵抗率: $1.68\mu\Omega\text{cm}$) が得られる。関係者によると、焼結の間に起こる銅の酸化を防ぐため、窒素雰囲気下で焼結を行ったという。さらに、CUNI-40KR を使い、インクジェット印刷すると、印刷性が非常に優れており、ポリイミド基板を用いインクジェット印刷された配線は、綺麗な形状をしていた。これらの金属ナノ粒子インクの特性を表3にまとめた。

http://hcc.hanwha.co.kr/english/pro/nan_nink_idx.jsp

表 3 インクジェット印刷用インクの仕様

	CUNI-20ED	CUNI-20CH	CUNI-40KR
金属	銅	銅	銅
銀含有量 (wt%)	30±5	40±5	40±5
インク形態	金属ナノ粒子	金属ナノ粒子	金属ナノ粒子
溶媒	PGMEA	PGMEA	PGMEA
焼結条件	250℃、30分	250℃、30分	250℃、30分
体積抵抗率 ($\mu\Omega\text{cm}$)	5±0.3	4±0.3	9±0.3



図 4 (左) 金、銀、銅ナノ粒子インク、(右) インクジェット印刷によって、ポリイミド基板の上に描画した配線

4. PARU

パルは、印刷による太陽電池、RFID、トランジスタの製造及び導電性インクを開発している韓国の会社である。展示ブースには、インクジェット印刷用の導電性インクならびに、すべて印刷プロセスによって製造されたフレキシブル RFID タグ用配線が展示されていた。ロールトゥーロールプロセスによって PET 基板上に製造した RFID 用配線を展示していたが、製造工程や製品の構造などの詳細説明は行っていなかった。また、インクジェット印刷用の銀ナノ粒子インクは、高い導電性（体積抵抗率： $8\mu\Omega\text{cm}$ ）と低温・短時間の焼結（ 150°C 、5分）、すぐれた保存安定性を有すると説明されていた。

<http://www.paru.co.kr/en/printed/pe01.asp>

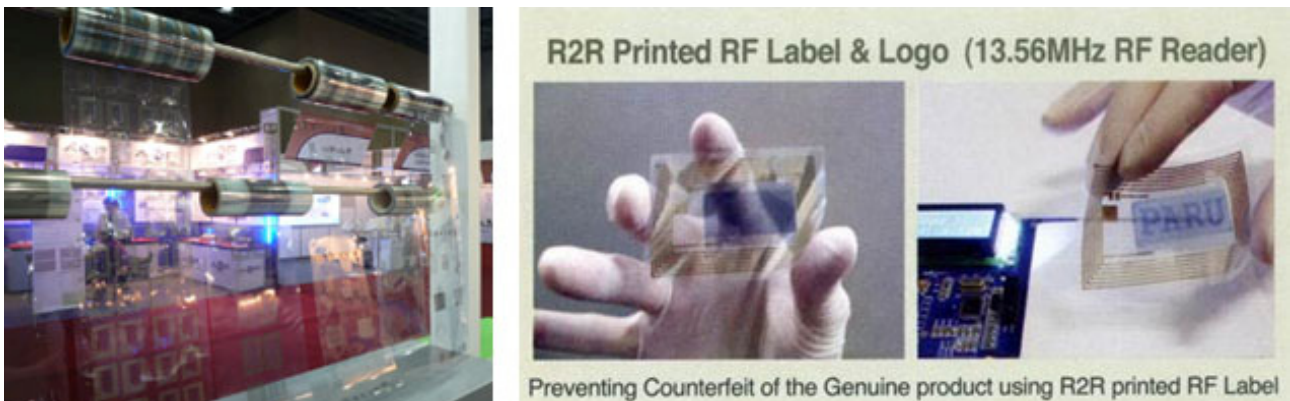


図 5 (左) PET 基板上に製造した RFID 用配線
(右) ロールトゥーロール印刷によって、製造したラベルとロゴ

5. 材料研究所

材料研究所は、材料関連分野の研究開発、試験評価等を行う韓国の国立研究所である。ナノ材料、太陽電池、燃料電池等が展示されていた。ナノパターンのマスクを使用せずポリマー表面にナノレベルの凹凸を形成するプラズマエッチング技術と、超撥水表面の製造方法が目立った。ナノレベルの凹凸を形成する技術は、太陽電池の反射膜に応用出来ると考えられる。また、超撥水処理を行った基板に水系のインクを用い、インクジェット印刷によるパターンは、非常に整った形状が得られる。更に、約 $30\mu\text{m}$ の線幅が実現された。

<http://www.kims.re.kr/en/main/main.html>

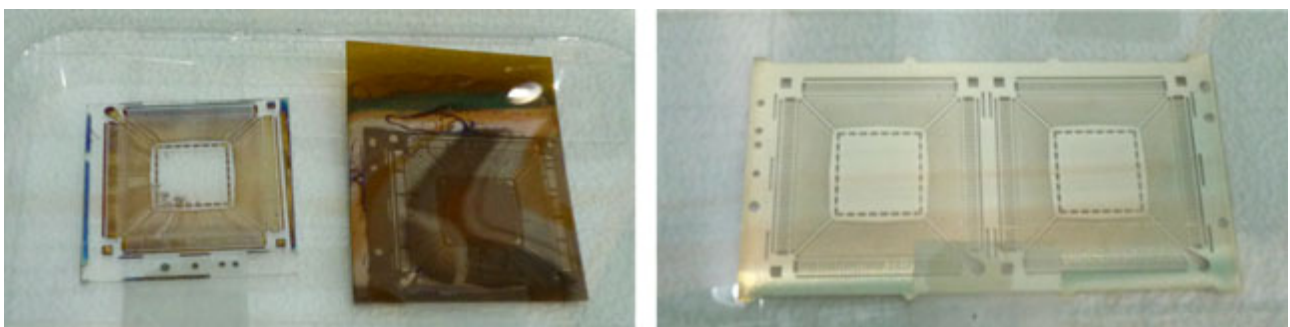


図 6 超撥水処理したプラスチック基板へ描画した配線。(左) ポリイミド、(右) PET

6. 富士フィルムダイマティックス

富士フィルムダイマティックスは、産業用の小型インクジェット印刷機で知られている。展示会には、DMP-2811 と DMP-3000 が展示されていた。印刷面積とヘッドの繰り返し精度が DMP-2811 の場合、それぞれ 210×260mm、±25um であるが、DMP-3000 の場合、それぞれ 300×300mm、±1um である。DMP-3000 は、DMP-2811 と比べ、大面積の印刷が可能で、印刷精度の向上等が特徴である。

<http://www.dimatix.com/divisions/materials-deposition-division/materials-printer-dmp-3000.asp>



図 7 (左) DMP-2811 (右) DMP-3000

7. UniJet

UniJet は、産業用のインクジェット印刷機を開発している韓国の会社である。OmniJet100 が展示されていた。OmniJet100 は、自社製のカートリッジだけではなく、Dimatix、Xaar 等のカートリッジも取り付けが可能という特徴がある。更に高精度の位置制御が実現されている。

http://www.unijet.co.kr/catalogue/detail.php?inoGood_no=3&ino_code=1010&list_change=&field=&keyword=&page=1



図 8 (左) OmniJet100 (右) 展示ブースの風景

論文紹介

常温処理で印刷銅配線を作製

$\text{Cu}_2\text{X}(\text{OH})_3$ ($\text{X} = \text{Cl}^-, \text{NO}_3^-$): synthesis of nanoparticles and its application for room temperature deposition/printing of conductive copper thin-films

Journal of Materials Chemistry (2010) DOI: 10.1039/c0jm00681e

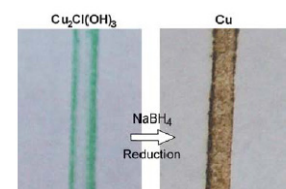
Silke Wolf, Claus Feldmann*

Karlsruhe Institute of Technology, Germany

2010年8月11日に発表された、銅化合物還元による銅配線作製に関する論文。

銅化合物 $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ (平均粒径 51nm) と $\text{Cu}_2(\text{NO}_3)(\text{OH})_3$ (平均粒径 37nm) は、200-500°Cで熱分解され、 Cu_2O (亜酸化銅) となる。しかし、これらの銅化合物を 10mol% NaBH_4 (水素化ホウ素ナトリウム) 水溶液で処理すると、室温で還元反応が進み、元々の緑色から銅褐色へ変化した。得られた銅褐色物質を XRD 測定を行ったところ、銅と少量の酸化銅が検出された。

これらの銅化合物を用いて、シリコン、ガラス、プラスチック、紙基板へ印刷・配線作製を行い、 NaBH_4 還元法によって、室温での銅配線作成に成功した。プラスチック基板上に作製した配線は、銅バルクと同程度の抵抗率を示した。この方法は、真空処理や高温処理及び有害な溶剤などを必要としない平易な印刷方法であり、耐熱、耐酸に劣る紙やプラスチックなどの基板にも利用できる。(cow)



室温還元される銅配線

論文紹介

印刷技術で作るナノポーラスメンブレンフィルター

Printable Nanoporous Silver Membranes

Chemistry of Materials (2010) DOI: 10.1021/cm1013152

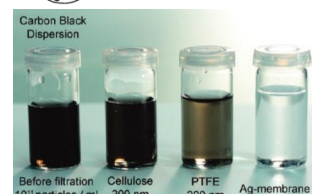
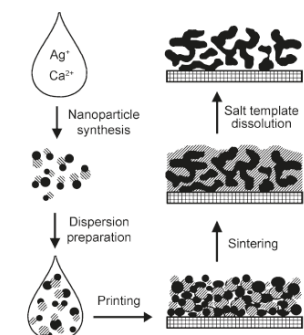
N. A. Luechinger, W. J. Stark* *et al.*

ETH Zurich, Switzerland

2010年8月10日に発表された、印刷技術で作製するナノポーラスメンブレンに関する論文。

銀・炭酸カルシウムナノ粒子インクを印刷し、焼結してナノポーラス銀フィルターを作製した後、塩酸で炭酸カルシウムを洗い流して、ポアサイズ 30-300nm、厚さ 0.5-5 μm のナノポーラスメンブレンを作製した(上図)。カーボンブラック水懸濁液(下図左、濃度 10^{11}mL^{-1})を用いて、ナノポーラスメンブレンの濾過性能を評価した。

カーボンブラックは非常に小さなナノ粒子であるため、市販のセルロースフィルター(200nm径)やPTFEフィルター(200nm径)では、それぞれ80%、40%程度のカーボンブラックがフィルターを通過してしまうが、ナノポーラスメンブレンはカーボンブラックと水の分離が可能であり(下図右)、わずか0.2-0.4%のカーボンブラックしか通過しなかった(nm)



フィルター製造方法と濾過液の外観

論文紹介

塗布法に適用可能な高性能n型有機電界効果トランジスタ材料

Solution-processed n-Type Organic Field-effect Transistors Based on Electronegative Oligothiophenes
Having Fully Oxo-substituted Terthiophenes

Organic Electronics (2010) DOI:10.1016/j.orgel.2010.07.014

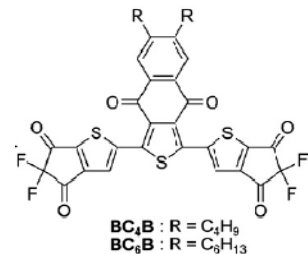
Yutaka Ie*, Masashi Nitani, Hirokazu Tada, Yoshio Aso*

Osaka University, Japan

2010年8月5日に発表された、新奇なn型FET材料の合成と有機電界効果トランジスタ特性評価についての論文。

有機半導体の研究において、相補性回路構築などの必要性から、p型およびn型半導体の両方が必要とされている。しかし、n型有機半導体については未だ研究途上であり、特に塗布法による薄膜作製が可能な化合物の種類は少ない。

本論文で新しく設計されたBC₄B, BC₆Bは、-3.8 eVの比較的低いLUMOレベルを有し、かつクロロホルムなどの一般的な有機溶媒に可溶である。これは、中央に配置されたチオフェン誘導体が電気陰性でかつアルキル基により可溶化されているためである。クロロホルム溶媒を用いたスピンコート法によって作製した薄膜は、X回折測定より配向性が確認され、これを用いたFET素子は真空中で最大0.016 cm²V⁻¹s⁻¹の電子移動度と10⁷のon/off比、15Vの閾値電圧を示した。この化合物は大気中でもFET挙動を示す。(mn)



論文紹介

銀ナノワイヤで透明プラフィルム表面を覆った新しい透明電極

A New Transparent Conductor: Silver Nanowire Film Buried at the Surface of a Transparent Polymer

Advanced Materials (2010) DOI: 10.1002/adma.201001811

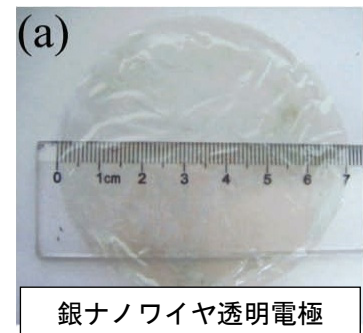
Xiao-Yan Zeng, Can-Zhong Lu* *et al*

Chinese Academy of Science, China

2010年8月3日に発表された、ポリビニルアルコール表面を銀ナノワイヤで覆った透明電極に関する論文。

銀ナノワイヤでPET基板上を覆い、その上にPVAをスピンコート・キャストし、銀ナノワイヤをPVAの上に転写し、透明電極を作製した。得られた透明電極は、銀ナノワイヤ/PVAコンポジット、ITO、CNT、PEDOT:PSS透明電極などよりも高透明・低抵抗であった。なかでも、テープ剥離・指などでの拭き取りによる抵抗率変化・裏表へ折り曲げた際の抵抗率変化・加熱や硫化ナトリウム水溶液へ浸した際の抵抗率変化などの機械的特性が非常に優れていた。

また、銀ナノワイヤで覆われたPVAを透明電極とした有機EL素子の試作を行ったところ、「絶縁性PVAの上に銀ナノワイヤが覆っている」、「銀ナノワイヤが光散乱」するため高性能を示した。(nm)



論文紹介

絶縁体/半導体ポリマーブレンド液インクジェット法を用いた有機トランジスタ

Inkjet-printed Single-droplet Organic Transistors Based on Semiconductor Nanowires Embedded in Insulating Polymers

Advanced Functional Materials (2010) DOI: 10.1002/adfm.201000528

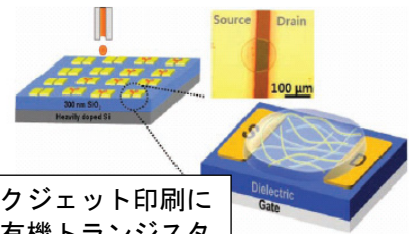
Kilwon Cho* *et al.*

Pohang University, Korea

2010年7月30日に発表された、半導体/絶縁体ポリマーブレンド液の液滴インクジェット法を用いた有機トランジスタの作製に関する論文。

低コストで大面積なフレキシブルエレクトロニクスデバイスを実現させるためには、トランジスタの活性層として有機半導体を印刷する過程が重要となる。半導体層内でのキャリア輸送能は有機半導体の結晶微細構造と分子配列に依存し、トランジスタの性能に大きな影響を与える。

本論文では、半導体/絶縁体ブレンドポリマーの単一液滴インクジェット法を用いて薄膜活性層の作製を行い、ブレンド溶液内の半導体 poly(3-hexylthiophene) (P3HT) 成分と絶縁体ポリマー (amorphous polystyrene) (PS) の溶解度の差を巧みに利用することで、PS 層のうえに P3HT のナノワイヤ形成に成功した。このユニークな構造を持ったブレンド膜は半導体ナノワイヤ内で効率的なキャリア輸送経路を形成し、トランジスタの On/Off 電流比や大気安定性も大きく向上している。(ts)



論文紹介

銀ナノワイヤのPDMSスタンプ転写によるPET基板透明電極

Uniform, Highly Conductive, and Patterned Transparent Films of a Percolating Silver Nanowire Network on Rigid and Flexible Substrates Using a Dry Transfer Technique

Nano Research (2010) DOI 10.1007/s12274-010-0017-5

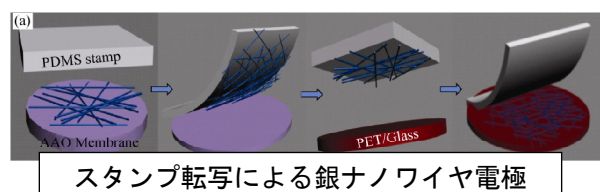
Anuj R. Madaria, Chongwu Zhou* *et al.*

University of Southern California, USA

2010年7月26日に発表された、PDMSスタンプ転写によるPET基板上への銀ナノワイヤ透明電極作製に関する論文。

Seashell Technologies 社製銀ナノワイヤをイソプロピルアルコールへ分散させた懸濁液を、陽極酸化アルミニウムフィルターで濾過・200度焼結した後、PDMSスタンプを使用して、PET基板へ転写した。得られた透明電極は、透過率80%、シート抵抗10ohm/sqを達成した。既往の報告では、銀ナノワイヤとPET基板の密着性が低かったが、本報告ではPDMSスタンプによって銀ナノワイヤをPET基板へしっかりと圧着させているため、透明電極の密着性は優れていた。

銀などの貴金属は石英ガラスなど極性の大きな基板と密着性が低いため、APTES処理をガラス基板へ施し(プラスチャージ)、ガラス基板へ密着した銀ナノワイヤ透明電極の作製にも成功した。(nm)



論文紹介

シリカナノ粒子のパーコーター塗布による太陽電池用光吸収膜

Fast and Scalable Printing of Large Area Monolayer Nanoparticles for Nanotexturing Applications

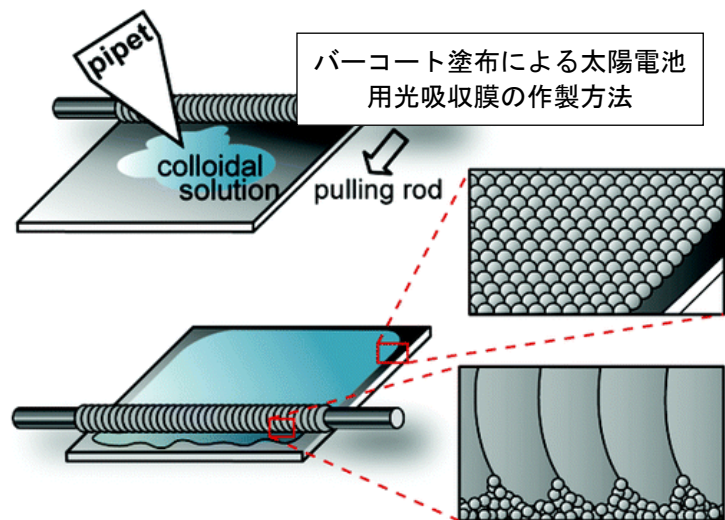
NANO Letters (2010) DOI: 10.1021/nl101432r

Sangmoo Jeong, Yui Cui* *et al.*

Stanford University, USA

2010年7月14日に発表された、シリカナノ粒子モノレイヤー製造方法に関する論文。アメリカスタンフォード大学のCui博士らのグループは、パーコーターを用いてシリカナノ粒子コロイド溶液をフレキシブル基板（PET基板）やリジット基板（シリコン、ガラス基板）上に塗布し、ナノテクスチャー薄膜を作製した。アモルファスシリコンフィルム上に塗布したナノテクスチャー薄膜は、光吸収率を大幅に向上し、撥水性も向上させた。

この方法は、極めて簡便な方法であるため、将来はロールトゥーロールプロセスによる高速度・大面積への印刷が可能である。また、コロイド溶液の蒸発速度などの最適化を行えば、将来は太陽電池基板へ応用が可能である。(nm)



論文紹介

フローティング機構を用いた有機トランジスタメモリ

Flexible Organic Transistor Memory Devices

NANO Letters (2010) DOI:10.1021/nl1009662

Soo-Jin Kim and Jang-Sik Lee*

Kookmin University, Korea

2010年6月25日に発表された、フローティング機構を用いた有機メモリに関する論文。

フローティング機構とはフラッシュメモリに代表されるEEPROMに用いられる技術である。

本論文では、フレキシブルな基板に溶液法で電荷トラップのための金の微粒子(Au_{NP})を製膜することが特徴であり、 Au_{NP} を用いることで従来の有機メモリの課題であった保存電荷の損失の解消に成功した。具体的には、耐久性を評価するための「書込み/削除」を700回繰り返しても性能の劣化は見られなかった。この耐久性は、有機トランジスタメモリを用いた安価なフレキシブルメモリ装置の実用の可能性を示唆するものである。データの保持特性を時間軸に対して評価すると、時間の経過に伴い減衰傾向が見られるものの、従来の有機メモリ素子に比較すると優れた結果を示した。さらに、曲げ耐性に関しては「曲げ/伸ばし」を1000回繰り返しても素子特性は維持された。

以上の結果から、今回開発した素子構造がプラスチックをベースとした回路に組み込むことが可能な技術となる事が明らかとなった。(mu)

論文紹介

水溶性ポリフルオレンを界面層として用いた有機太陽電池

Water-Soluble Polyfluorenes as an Interfacial Layer Leading to Cathode-Independent
High Performance of Organic Solar Cells

Advanced Functional Materials(2010) DOI:10.1002/adfm.200902386

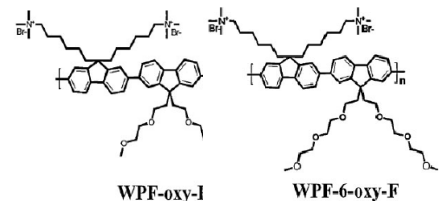
Seung-Hwan Oh, Seok-In Na, Jang Jo, Bogyu Lim, Doojin Vak and Dong-Yu Kim*

Gwangju Institute of Science and Technology, Korea

2010年6月23日に発表された、水溶性ポリフルオレンを陰極界面層に用いた有機太陽電池(OSCs)に関する論文。

OSCsの電極に用いる金属は大気安定で塗布法に適用可能なものが望ましいが、大気安定な貴金属は高価で、量産には不向きである。一方、安価な金属は仕事関数が大きいいため開放端電圧(V_{OC})が減少し、太陽電池の性能が落ちる。これを改善するため、有機薄膜活性層と金属電極の間に界面層を挿入することが有効であることが明らかとなっている。

本論文では界面層としてWPF-oxy-FとWPF-6-oxy-Fをそれぞれ挿入することで、太陽電池の効率を向上させることに成功した。これは、カチオン性アンモニウムイオンとエチレンオキシド側鎖が大きな仕事関数の金属陰極と活性層の界面双極子を誘導したためと考えられる。また、これらの化合物は水溶性であるため有機薄膜にダメージを与えない。コストは低いが仕事関数が大きく太陽電池の量産に不向きだとされていたCu陰極を用いた場合でも、WPF-6-oxy-Fを挿入すると V_{OC} は0.27Vから0.63Vに、素子の電力変換効率率は0.8%から3.36%に向上した。(ak)



論文紹介

MODインクを利用したUV硬化樹脂での3次元微細構造パターン

Pattern Formation of Silver Nanoparticles in 1-, 2-, and 3D Microstructures
Fabricated by a Photo- and Thermal Reduction Method

Advanced Functional Materials (2010) DOI: 10.1002/adfm.201000055

Jong-Jin Park* *et al.*

Samsung Advanced Institute of Technology, Korea

2010年6月19日に発表された、UV硬化樹脂中でのMODインク(metallo-organic decomposition インク)の銀析出を利用した3次元微細構造パターン作製に関する論文。

露光処理はUV硬化樹脂中の銀塩が銀粒子へ析出する際に影響を与え、加熱処理は銀粒子の成長過程で効果があることが分かった。露光処理と加熱処理を併用すると、銀塩の還元率、サイズ、および銀粒子の配置、樹脂構造を制御することができた。従来のMODインクを用いた配線形成と違い、金属塩を含有した樹脂で構造物を作った後に、金属を析出させるアプローチを用いており、今後の有機エレクトロエレクトロニクスへの応用が期待できる。MODインク(銀トリフルオロ酢酸塩(STA))と感光性重合体をエポキシ樹脂(SU-8)中にわずか数%混ぜるだけで銀粒子同士が結合し架橋構造ができることが分かった。これは、露光処理と加熱処理を併用したことで銀粒子の持つエネルギーが増加し、結合力が高まった結果である。(cow)

論文紹介

ローラーペイント法を用いた高効率ポリマー太陽電池の作製

Annealing-Free High Efficiency and Large Area Polymer Solar Cells

Fabricated by a Roller Painting Process

Advanced Functional Materials (2010) DOI: 10.1002/adfm.201000164

Jae Woong Jung and Won Ho Jo*

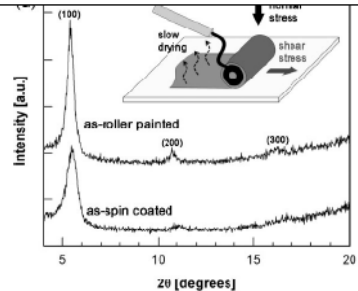
Seoul National University, Korea

2010年6月17日に発表された、ペインティングローラーにより作製した poly(3-hexylthiophene) (P3HT) / [6,6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PCBM) 薄膜の有機太陽電池についての論文。

熱アニール後で光電変換効率 4.6% (同様の活性層をスピコート法で薄膜化した際の光電変換効率は 3.9%)、アニール無しで 3.8% を達成しており、素子面積を 5 cm^2 のまで大きくした場合でも 2.7% の変換効率を保っている。

今回使用したローラーペイント法は古典的な手法であるが、簡便であり膜厚と均一性の制御に優れている。また、圧力をかけながら製膜することによりポリマーの配列が整い、さらにゆっくりと乾燥させることで結晶性の薄膜となっている。この手法を活かすことで得られた光電変換効率 3.8% (短絡電流 10.8 mA cm^{-1} , 曲線因子 0.60) は、アニールなしの有機薄膜型太陽電池としては最高の値である。(mn)

簡単な印刷方法による高効率太陽電池の作製方法



論文紹介

有機太陽電池向け金属グリッド/導電性ポリマーのハイブリッド透明導電膜

Metal grid/conducting polymer hybrid transparent electrode for inverted polymer solar cells

APPLIED PHYSICS LETTERS, (2010) DOI: 10.1063/1.3394679

Jingyu Zou, Alex K.-Y. Jen* et al.

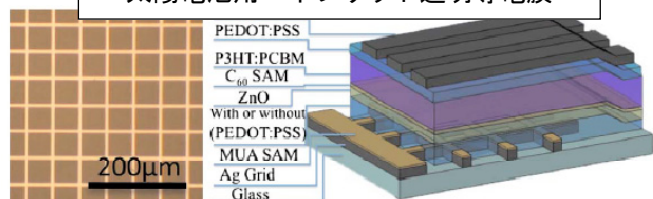
University of Washington, USA

2010年5月17日に発表された金属グリッドと導電性ポリマーのハイブリッド透明導電膜の有機太陽電池への応用に関する論文。

導電性ポリマーは抵抗値が高く ITO と比較すると有機太陽電池の性能が低下する課題があった。筆者らはマイクロコンタクトプリント法によって作製した銀グリッド (ライン幅/ピッチ間隔: $5/50 \mu\text{m}$, $10/100 \mu\text{m}$, $20/200 \mu\text{m}$) を導電性ポリマー-PEDOT:PSS と組み合わせることによって ITO に匹敵する透過特性とシート抵抗を有する透明導電膜を作製する

ことに成功した。このハイブリッド透明導電膜を有機太陽電池に応用させることで 3.2% という高い変換効率を得ることができた。ハイブリッド透明導電膜は安価で大面積に作製可能であることから、有機太陽電池に応用される可能性がある。(tok)

太陽電池用ハイブリッド透明導電膜



論文紹介

塗布法のみで有機トランジスタを作製

All-Solution-Processed Selective Assembly of Flexible Organic Field-Effect Transistor Arrays

Applied Physics Express (2010) DOI: 10.1143/APEX.3.051601

Masataka Kano, Takeo Minari, and Kazuhito Tsukagoshi*

RIKEN, Dai Nippon Printing Co., Ltd., NIMS, NIAST, CREST, Japan

2010年5月14日に発表された、塗布法のみでの有機電界効果トランジスタ(OFET)の作製に関する論文。

OFETにおいては電極、ゲート絶縁膜、有機半導体層で構成され、通常、これらは蒸着法を用いて作製される。一方、本論文では、有機化合物の表面選択的な吸着能と自己組織化能を巧みに利用することで、大気雰囲気下での塗布法、かつ、フレキシブル基板として用いた poly(ethylene naphthalate) のガラス遷移温度 (150°C) 以下の条件で全ての作製プロセスを行うことに成功した。作製したアクティブマトリックス OFET の on/off 比は 10^6 に達し、ヒステリシスのないトランスファー特性を示した。平均の移動度と駆動電圧はそれぞれ $0.016 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 、 -2.7 V で、標準偏差はそれぞれ 0.0064、0.96 であった。各素子は完全に独立しており、素子間におけるクロストークも観測されなかった。今回の手法により作製した OFET は実用に向けて幅広い応用が期待される。(Arto)

論文紹介

フォトリソプロセスによりシリコン基板へ埋め込んだ伸縮性金導体

Stretchable gold conductors embedded in PDMS and patterned by photolithography:
fabrication and electromechanical characterization

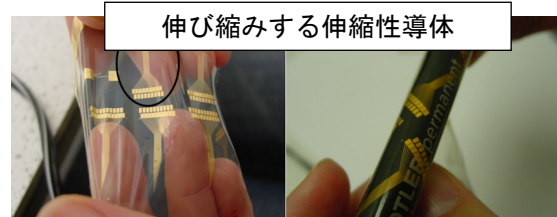
Journal of Micromechanics (2010) DOI: 10.1088/0960-1317/20/5/055025

T. Adrega and S. P. Lacour*

University of Cambridge, UK

2010年4月23日に発表された、フォトリソグラフィによってシリコンフィルムへ埋め込んだ伸縮性金導体に関する論文。PDMS シリコンは、熱膨張率が大きく、溶媒中で膨潤しやすいため、エッチングやフォトリソプロセスへの適用が難しかった。本研究では、PDMS フィルムへ金蒸着・フォトリソ・エッチング処理を行い、伸縮性導体の開発に成功した。

作製した伸縮性導体の最小パターンニングは、金属フィルムは幅 $10\mu\text{m}$ 、シリコン基板溝は幅 $20\mu\text{m}$ と非常に微細なものである。そして、シリコン基板上のマイクロパターン導電体は、1D 方向には 30%、2D 方向に 12% 引っ張っても導電性を示し、ひずみ解放後には元の抵抗値を示した。導電体を引っ張ると、導電体にランダムにかつ独立したマイクロサイズ ($\sim 100\text{nm}$ 長) の割れ目が形成されるため、このように大きな伸縮性を示しながらも導電性を示す。1 軸方向に引っ張ると伸長方向とは垂直な方向に数 μm の割れ目が形成される。2 軸方向に引っ張ると、導電体が割れて島が形成され、その島同士が離れていく。このように、伸縮可能な基板上に直接金属フィルムを形成した材料は、柔軟でかつ究極に薄い MEMS などのエレクトロニクス機器の開発に貢献できる。(tpe)



論文紹介

銀ナノワイヤーを塗布したフレキシブルな透明導電膜

Scalable Coating and Properties of Transparent, Flexible, Silver Nanowire Electrodes

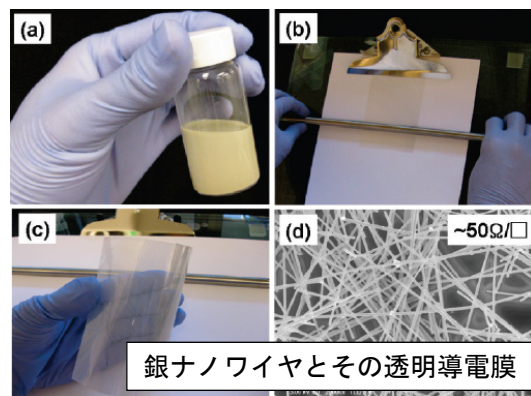
ACS Nano (2010) DOI: 10.1021/nn1005232

Liangbing Hu, Yi Cui* *et al.*

Stanford University, USA

2010年4月21日に発表された、銀ナノワイヤーの塗布により作製した透明導電膜に関する論文。銀ナノワイヤー溶液をバーコーターを用いてPET基板上に塗布することで透明導電膜を作製した(加熱温度 60-120°C)。得られた透明導電膜は、透過率 80%、ヘイズ 10%、表面抵抗率 20-50Ω/□であった。この銀ナノワイヤー塗布透明導電膜はITOと比較して近赤外領域の透過率が優れているため、太陽電池に用いた際には効率向上が期待できる。従来のITO基板は5mm, 100回曲げると抵抗値が3桁以上増加するが、銀ナノワイヤー塗布透明導電膜は抵抗値が変化することなく、もちろん割れることなかった。

また、ナノワイヤーの高アスペクト化、金コーティング、プレスなど手法により透過率・電気抵抗の特性を向上させた。将来は銀ナノワイヤー透明導電膜が太陽電池の高効率化・フレキシブル化を実現することが期待される。(tok)



銀ナノワイヤとその透明導電膜

論文紹介

銀ナノペースト印刷配線の電気抵抗と高周波特性

Electrical Characterization of Screen-Printed Conductive Circuit with Silver Nanopaste

Japanese Journal of Applied Physics (2009) DOI: 10.1143/JJAP.48.06FD14

Jong-Woong Kim, Seung-Boo Jung*.

Sungkyunkwan University, Korea

2009年6月22日に発表された、銀ナノ粒子ペースト印刷配線の加熱処理条件と高周波特性の関係性に関する論文。

アドバンスド・ナノマテリアルズ社の銀ナノ粒子ペーストを用い、スクリーン印刷によってライン幅 120μm、ギャップ幅 100 μm の配線をシリコンウェハー上に作製した。作製した配線を、加熱温度 150-300°C、処理時間 15-60 分と様々な条件で処理を行い、銀ナノ粒子の形態変化(融着挙動)を電子顕微鏡観察し、配線の直流電気抵抗、高周波特性(Sパラメータ)の評価を行った。これらの結果から、銀ナノペースト配線は高温処理するほど、電気抵抗が小さくなり、より優れた高周波特性を示すことが明らかとなった。

また、同グループは、2010年 Microelectron Engineering 誌 (doi:10.1016/j.mee.2009.06.012) においても、スクリーン印刷した銀ナノ粒子ペースト配線の電気抵抗・高周波特性に関する研究を報告している。同論文においては、加熱処理温度を中心に議論を行い、本論文と同様に、より優れた高周波特性を得るためには配線への高温加熱処理が必要であると結論づけている。(cow)

論文紹介

UV照射によるMODインク配線の室温焼結

Room temperature preparation of conductive silver features using spin-coating and inkjet printing

Journal of Materials Chemistry (2010) DOI: 10.1039/b917266a

Josué J. P. Valetón, Ulrich S. Schubert, Patrick J. Smith* *et al.*

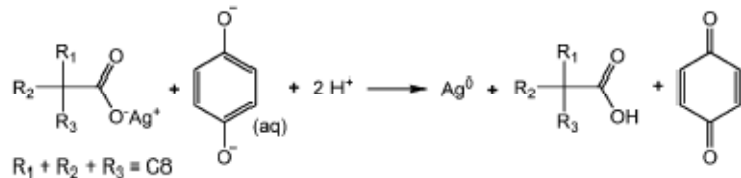
Eindhoven University of Technology, The Netherlands, Albert-Ludwigs-University, Germany

2009年11月13日に発表された、銀 MOD インク (metallo-organic decomposition インク) への UV 照射を行い、PET などプラスチック基板上へ配線を室温作製した論文。

インクジェット法やスピコート法で MOD インクを PET 基板上にパターンニングし、UV 照射によって、ネオデカン銀とヒドロキノンのレドックス反応 (上図) を用いて還元を行った。

得られた銀配線の導電率はバルク銀の約 10% (6.5×10^6 S/m) であった。この方法は、室温で焼結が行えるので、紙や PET などのポリマー基板を用いることができる。また、PET 上に作製した銀配線へ引張試験を行うと、2.5%以内の

伸びでは抵抗値は変化せず、12,000 回の繰り返し曲げ試験を行っても、抵抗値は変化しなかった。(cho)



論文紹介

銅有機化合物による印刷銅配線

A low-cure-temperature copper nano ink for highly conductive printed electrodes

Current Applied Physics (2009), DOI:10.1016/j.cap.2009.03.008

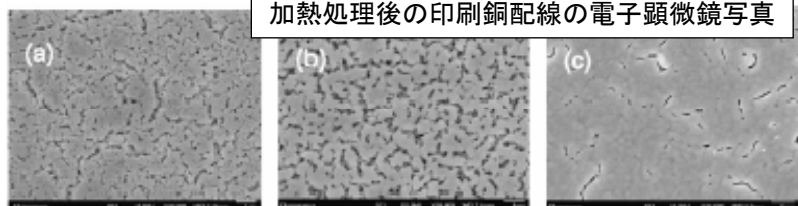
Byoungyoon Lee*, *et al.*

R&D Center, Chang Sung Co. Ltd, Korea

2009年5月13日に発表された、銅有機化合物を用いた印刷銅配線作製に関する論文。

銅有機化合物($Cu(C_9H_{19}COO)_2$)に水酸化銅 $Cu(OH)_2$ と増粘剤(ターピネオール)を加えてペーストを作製した。ガラス基板上にスクリーン印刷したペーストを、3%水素雰囲気下・250~400°C加熱処理を行い、銅配線を作製した。この際、ナノ~マイクロまでサイズの違う3種類の水酸化銅粒子(10 μ m以上、3 μ m、100nm以下)を用いたインクにおいて、熱分解挙動ならびに配線の電気抵抗などを評価した。

いずれのインクも同じ熱分解挙動を示したが、ナノサイズ水酸化銅粒子を用いた配線が、最も小さな抵抗率を示した。これは、ナノ粒子は低温で表面拡散を起こし、配線が高密度化するためであると考えられる。その結果、5.4 $\mu\Omega$ cm (250°C・20分)、4.1 $\mu\Omega$ cm (400°C・60分)の抵抗率を達成した。(cow)



論文紹介

インクジェット波形を調整し幅25 μm のラインを描画Inkjet printed, conductive, 25 μm wide silver tracks on unstructured polyimide

Physica Status Solidi A (2009) / DOI 10.1002/pssa.200925088

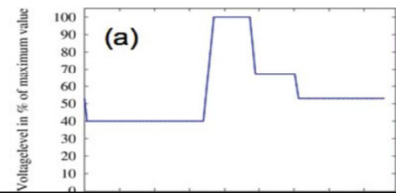
Henning Meier, Ute Löffelmann, Dario Mager, Patrick J. Smith*, and Jan G. Korvink

Department of Microsystems Engineering (IMTEK), University of Freiburg, Germany

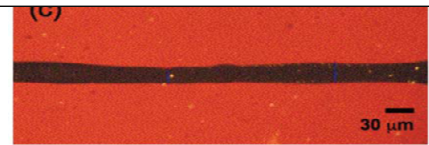
2009年4月2日に発表された、銀ナノ粒子インクを用いたインクジェット印刷による幅25 μm の配線描画に関する論文。

Meierらは、標準10p μl のプリンタカートリッジのインクジェットプリンタを使用し、インク吐出波形の改良と、カートリッジと基板温度を55 $^{\circ}\text{C}$ に暖めることで、液滴サイズを2p μl まで小さくした。その結果、表面処理などを行っていない無垢のポリイミド基板の上に幅25 μm の配線描画に成功した。印刷回数を増やしていくとライン幅は太くなったが、配線の電気抵抗は小さくなった。この結果は、インクカートリッジの大きさに関わらず、インクの吐出波形やインクの温度などを変えることによって、微細な配線を描画することが可能ということを示している。

なお、2008年Noguchiらも、インクジェットプリンタの波形調整によって液滴サイズを小さくし、その結果、高性能TFTの試作に成功している。(CJK)



インク吐出波形（上）と描画配線（下）



論文紹介

ポリマー基板へダメージを与えないアルゴンプラズマ焼結

Argon plasma sintering of inkjet printed silver tracks on polymer substrates

Journal of Materials Chemistry (2009) DOI: 10.1039/b823329b

Ingo Reinhold, Ulrich S. Schubert* *et al.*

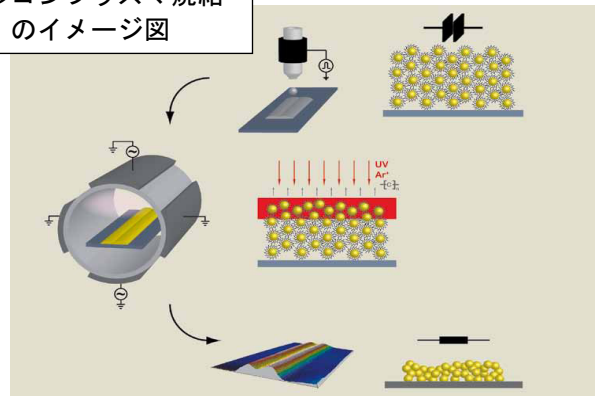
Eindhoven University of Technology, The Netherlands

2009年4月24日に発表された、アルゴンプラズマを用いた銀ナノ粒子インクの焼結に関する論文。

直径5-10nmの銀ナノ粒子が約57.4wt%含有されているインク（ハリマ化成社製）をノズル直径約70 μm のインクジェットプリンタを用い、ポリカーボネート、PET、ガラス基板上に印刷した。印刷したパターンをアルゴンプラズマ焼結すると、加熱焼結と同等の電気抵抗率が得られた

（銀バルクの約3倍）。ガラス基板の上に印刷した配線は、省エネルギーで効果的に電気抵抗率が小さくなっており、この結果は、基板の熱伝導率に関係すると予想している。以上の結果より、アルゴンプラズマを用いた焼結方法は、加熱焼結とは違い、基板側へダメージを与えないため、安価で耐熱温度の低いポリマー基板へ応用が可能である。(CJK)

アルゴンプラズマ焼結のイメージ図



論文紹介

シリコン結晶太陽電池の銀厚膜接点における銀結晶形成のメカニズム

Mechanism for the formation of Ag crystallites in the Ag thick-film contacts of crystalline Si solar cells

Solar Energy Materials and Solar Cells (2008) doi:10.1016/j.solmat.2008.10.021

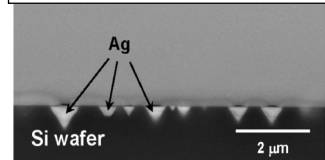
Kyoung-Kook Hong, Joo-Youl Huh* *et al.*

Korea University, Korea

2008年12月6日に発表された、Si結晶系太陽電池の銀厚膜接点における銀結晶形成のメカニズムに関する論文。ガラス/Si界面での銀結晶の形成におけるガラスフリットの役割、特にガラスフリット中のPbOの役割に関して研究した。2種類の異なるPbO量を含むガラスフリットを用い、さらに(0、2、4、6、12、67wt%) Agを添加する事で複数のガラスフリットを作製した。これらのガラスフリットをn-type(100)CZ Siウエハ上に印刷後、150°C、10minで乾燥させ、800°C、20minで焼結した。作製した試料の断面をFE-SEMにて観察し、各組成をEDXによって特定した。

ガラスフリット中のAgイオンはSiウエハとPbの補助無しで反応していた。ガラスフリット中のAg含有量を増加させると、PbOとSiウエハの酸化還元反応によるPbの形成が抑制された。ガラス/Si界面に形成する逆ピラミッド型Ag結晶のサイズや分布はPbO含有量に依存し、PbO含有量が小さい時Ag結晶は均一に分布する。(S.S)

ガラス/Si界面での銀結晶形成



論文紹介

空気中で安定な銅ナノ粒子インク

Graphene-stabilized copper nanoparticles as an air-stable substitute for silver and gold in low-cost ink-jet printable electronics

Nanotechnology (2008) DOI: 10.1088/0957-4484/19/44/445201

Norman A Luechinger, Evagelos K Athanassiou and Wendelin J Stark*

ETH Zurich, Switzerland

2008年9月26日に発表された、グラフェンで保護された空気中で安定な銅ナノ粒子インクの製造方法とインクジェット印刷された銅ナノ粒子配線に関する論文。2006年にAthanassiouらが報告した炎還元合成方法によって、グラフェンで包まれた銅ナノ

粒子を製造した。この銅ナノ粒子は、両親媒性の界面活性剤で保護されているため、空気中で高い安定性を示し、化学的に不活性である。製造した水ベースの銅ナノ粒子インクは、家庭用インクジェットプリンタを用いて、OHPフィルム上に配線を描画できる(空気中で120°C、2時間加熱)。得られた配線の導電性は1 S/cmと小さな値であったが(銅バルク導電率 5.9×10^5 S/cm)、強い金属光沢を示しており、低電流の製品や遮蔽効果、装飾を意図するエレクトロニクスには十分使用することができる。グラフェンでコーティングされた銅ナノ粒子は、高い安定性を持ち合わせているため、将来、銀や金のナノコロイドより経済的な製品として大いに活躍できることを期待できる。(tpe)

OHPフィルム上の銅ナノ粒子インク配線



PE ヘッドライン No.3-5 より

2010年6月

★(社)新化学発展協会所属のプリンタブルWGから委託調査公募のご案内★

(社)新化学発展協会所属のプリンタブルワーキンググループは、平成22年度、公募により『自然を利用したエネルギー分野ならびに省エネルギー分野におけるデバイスに関わる部材について、プリンタブルエレクトロニクス技術の可能性調査』に関する技術委託調査を行うこととした。応募は電子メールにて受け付ける。

(社)新化学発展協会 プリンタブルWG <http://www.aspronc.org/>

●DuPont社、太陽光発電用研究施設を北米に展開(DuPont社プレスリリースより)

2010年6月7日

DuPont社は急成長している太陽光発電エネルギー市場に向けての材料開発をサポートするために、北米で太陽光発電用研究施設を開設した。

<http://onlinepressroom.net/DuPont/NewsReleases/>

●チッソ、プリンタブルエレクトロニクス本格事業化へ(化学工業日報より)

2010年6月14日

チッソは、プリンタブルエレクトロニクス事業を本格的に推進する。主力市場と位置付け期待している回路基板や液晶パネル向けに加え、太陽電池やセンサー用部材向けでも積極的に展開。各業界で高いシェアを持つメーカーと組み、同社の絶縁性インキなどの製品、技術をデファクトスタンダードとして確立したい考え。2010年度で新規案件10件以上の受注を目指す。

http://www.chemicaldaily.co.jp/news/201006/14/01401_2121.html

●太陽電池分野で東京エレクトロンとナノ粒子の英Nanoco社が共同開発(日経TechOn!より)

2010年6月14日

ナノ粒子の製造技術を持つ英Nanoco Group plcは、ナノ粒子を使った太陽電池向け薄膜の開発に関して、製造装置メーカーの東京エレクトロンと共同開発契約を結んだ。Nanocoは、東京エレクトロンの太陽電池用製造装置に向けて、ナノ粒子を開発する。化学プロセスによるバッチ処理で、一度にkgオーダーのナノ粒子を製造できる。

<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20100614/183442/?ref=rss>

●Thin Film Electronics ASA社のThin film Memory製品がEU規格の玩具の安全性を満たす(Thin Film Electronics ASA社プレスリリースより)

2010年6月18日

Thin Film社の非揮発性メモリ製品が玩具の化学的安全条件EN71-3証明を受けた。

許可の下りた非揮発性メモリ製品は、ロールツーロール方式によって製造されており電子玩具(smart toys)の低コスト化を目指していく。

http://www.thinfilm.se/index.php?option=com_content&view=article&id=211:thinfilmmemoryeucertified&catid=38:press-releases&Itemid=92

●韓国SAINTの研究グループが、透明電極用の30インチグラフェンフィルムをロールツーロールプロセスで製造(Nature Nanotechnologyより)

2010年6月20日

SKKU Advanced Institute of Nanotechnology (SAINT)のHongとAhnらの研究グループは、フレキシブルな銅基板の上に化学蒸着法によって成長させた30インチグラフェンフィルムのロールツーロールプロセスとウェットケミカルドーピング方法を開発した。このフィルムは透過率97.4%・シート抵抗率125Ω/□または、透過率90%・シート抵抗率30Ω/□を示す。共著者として、名城大学 飯島先生も名を連ねている。

<http://www.nature.com/nnano/journal/vaop/ncurrent/abs/nnano.2010.132.html>

●プリンタブルからプリンテッドへ「まずは電子書籍と照明から」(日経TechOn!より)

2010年6月22日

プリンテッド・エレクトロニクスの製品化が、電子書籍端末や有機EL照明の分野で始まろうとしている。

その一端として、米 General Electric Co. (GE 社) は 2010~2011 年にフレキシブル有機 EL 照明を製品化する。国内ではソニーが 2009 年 6 月の組織変更で、フレキシブル有機 EL パネルの早期事業化を目指す体制を固めた。

<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/FEATURE/20100616/183500/?ST=device>

●英 Xennia 社は Reggiani 社と共同で布に印刷が可能なインクジェットプリンタを開発(Xennia プレスリリースより)

2010 年 6 月 25 日

英 Xennia 社は、布上にインクジェット印刷が可能なプリンタを開発した。布上に 1 時間当たり 350m² の速度で印刷することが可能であるという。このプリンタによって、機能的衣類を大量生産することができると期待されている。

<http://www.xennia.com/uploads/100625-PR-Reggiani.pdf>

<http://www.plusplasticelectronics.com/smartfabricstextiles/inkjet-printing-on-textiles-has-printed-electronics-potential-15016.aspx>

●富士フィルム、太陽電池部材に参入 (日本経済新聞より)

2010 年 6 月 24 日

富士フィルムは写真フィルムで培った技術を応用し、耐熱性や耐電圧性に優れた防護膜や、発電効率を高める光反射膜など複数の太陽電池用高機能フィルムを開発した。

2011 年 3 月までに量産を開始し、12 年度には年間 50 億円の売上げを目指す。

<http://www.nikkei.com/tech/news/article/g=96958A9C93819696E3E1E2E2968DE0E1E2E4E0E2E3E28698E0E2E2E2;da=96958A88889DE2E0E2E5EAE5E5E2E3E7E3E0E0E2E2EBE2E2E2E2E2E2>

●フレキシブル有機トランジスターメモリ素子の開発(Nano letter より)

2010 年 6 月 26 日

Kookmin 大学の Jang-Sik Lee らは、非揮発性で柔軟性に富む、有機メモリ素子を開発した。

有機誘電層上に自己組織化させた金ナノ粒子層を作製し、その層で電子を保持することで情報を記録する。

開発者は今回作製した有機メモリ素子を用いて、オール有機電子デバイスの作製が可能かもしれないと述べている。

<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl1009662>

●太陽電池変換効率の記録更新、米イノバライト約 19%達成

2010 年 6 月 27 日

シリコンインクをベースに高効率の太陽電池材料、テクノロジーのプラットフォームを販売しているイノバライト社は、シリコンインク加工の太陽電池で変換効率 19%の新記録を達成したと発表した。

<http://www.greentechmedia.com/articles/read/ja-solar-relying-on-innovalight-to-improve-efficiency-to-18.9/>

◎特集記事「有機半導体とプリンタブルエレクトロニクス」(月間ディスプレイ 2010 年 5 月号より)

2010 年 5 月 1 日発行

月間ディスプレイ 5 月号で「有機半導体とプリンタブルエレクトロニクス」が特集された。詳細は、月刊ディスプレイ 5 月号を参照

<http://www.techno-times.co.jp/b-con2010.htm#10-05>

◎特集記事「SID2010」報告(日経エレクトロニクス 6 月 28 日号より)

2010 年 6 月 28 日

2010 年 5 月 23~28 日、世界最大のディスプレイ関係の国際会議「SID2010」が開催された。今回の SID では、フレキシブル・ディスプレイ関連にも多くの新技術が発表された。本特集では、SID2010 の総括を行うとともに、「巻取り可能な有機 EL パネル(ソニー)」など特に注目を集めた技術に関して解説を行っている。

<http://www.nikkeibpm.co.jp/cs/mag/ele/ne/saishin.html>

2010 年 7 月

●三菱重工が厚紙対応の LED-UV 枚葉機を発表(印刷タイムズより)

2010 年 7 月 1 日

三菱重工印刷紙工機械は、厚紙や樹脂原反の印刷に対応する LED-UV 乾燥システムを搭載した菊全枚葉機を発表した。対応紙厚は 0.04–1.0 ミリ。最高印刷速度は毎時 1 万 6200 回転。LED 光源は薄紙仕様と同じもので、照射波長は 385nm である。

<http://www.monz.co.jp/2010/07/led-uv-1.html>

●大日本印刷、太陽電池向け新封止材を開発（大日本印刷プレスリリースより）

2010 年 7 月 1 日

大日本印刷は結晶シリコン太陽電池向けポリオレフィン系封止材「CVF1」を開発した。従来のポリオレフィン系封止材の特性に加え高い透明性、広温度域で優れた柔軟性と耐熱性を備えている。結晶シリコン太陽電池の薄膜化が進み、割れやクラックを防止するためより柔軟性が高い封止材が必要であった。2012 年度 50 億円の売り上げを目指す。

http://www.dnp.co.jp/news/1215956_2482.html

●E-Ink 社、次世代ディスプレイ技術を発表(E-Ink 社プレスリリースより)

2010 年 7 月 1 日

E-Ink 社は、次世代ディスプレイ技術、「パール」の第 2 四半期のリリースを発表した。

パールを用いることで、反射ディスプレイのコントラスト比が約 50%となり、印刷紙上の文字を読む感覚と近くなる。

http://www.businesswire.com/portal/site/home/permalink/?ndmViewId=news_view&newsId=20100701005884&newsLang=en/

●NEDO、太陽電池開発コンソーシアムを採用(日刊工業新聞より)

2010 年 7 月 1 日

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は、2010 年度から 5 年間の太陽電池開発プロジェクトの実施体制を発表した。素材やセル、装置など多様な分野の企業、大学からなるコンソーシアムや技術研究組合が開発する「オープンイノベーション」方式を中心に据える。NEDO では、個々の企業の独自開発が高コスト体質を招き、新興国との競争に不利に働いたと見て、異例の実施体制を決めた。

<https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/press/FF/nedopress.2010-06-24.9376942915/>

●米 Methode 社、キュアが不要な導電性インクを開発(Printed Electronics World より)

2010 年 7 月 1 日

米 Methode 社は、ポリイミド基板上に回路の形成が可能なインクジェット印刷用の導電性インクを開発したと発表した。このインクと特殊処理を行ったポリイミド基板を用いると、キュアを行わなくても回路を形成することが可能である。また、インクと基板は良い接着性を有しているという特徴がある。

http://www.printedelectronicsworld.com/articles/conductive_inkjet_printable_ink_prints_circuits_directly_on_polyesters_00002405.asp

●有機太陽電池開発へ産学官連携プロジェクト始動(日刊工業新聞より)

2010 年 7 月 2 日

東京大学先端科学技術研究センターの瀬川浩司教授を中心研究者とする有機太陽電池開発の産学官連携プロジェクトが発足した。センター内に特設研究室を設け有機太陽電池の早期実用化を目指す。

<https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/press/FF/nedopress.2010-06-24.9376942915/>

●信州大学、有機薄膜太陽電池の発電効率 2 割向上(日経産業新聞より)

2010 年 7 月 2 日

信州大学の木村睦准教授らは、太陽光に対して正面にあった従来の電極位置を左右に変えることで、発電効率を高めた。従来に比べて効率を 20%以上向上できる可能性があり、民間企業と協力して早期の実用化を目指す。

●「有機 TFT の CMOS 回路でも MHz 動作は可能」、東大が RFID タグなどに向けた研究成果を発表(Tech-On より)

2010 年 7 月 6 日

東京大学は、有機 TFT の CMOS 回路への応用に向けた研究成果を、アクティブ・マトリクス型ディスプレイの国際学会「AM-FPD 10」(2010 年 7 月 5~7 日、東京工業大学で開催)で発表した。

<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20100706/184020/>

●Mekoprint 社ら、完全ロール・トゥ・ロールプロセスによるポリマー太陽電池モジュールの組み立て (Journal of Materials Chemistry より)

2010年7月8日

デンマーク工科大学と Mekoprint 社は、ポリマー太陽電池モジュールの組み立てを、フレキシ印刷、ロータリースクリーン印刷などから構成される完全ロール・トゥ・ロールプロセスで行った。論文中では、試作した太陽電池モジュールの詳細な構成ならびに性能も報告している。

<http://www.rsc.org/Publishing/Journals/JM/article.asp?doi=c0jm01178a>

●図研、株式会社アルバックと協調し、プリンテッド・エレクトロニクス市場に専用ソリューション「DFM Center for Inkjet」をリリース開始 (図研プレスリリースより)

2010年7月12日

株式会社図研は、株式会社アルバックと協力し、インクジェット装置のプロントエンド・ツールとして、「DFM Center for Inkjet」をリリースした。「DFM Center for Inkjet」を用いることによって、各種 CAD データから容易にインクジェット装置用データを自動作成することが可能となる。更に、大幅な工数削減につながるのと共に常に高い品質を保つことができる。

<http://www.zuken.co.jp/news/detail/000712.html>

●SoloPower 社が、フレキシブルな CIGS 薄膜太陽電池 SFX module シリーズを発表(SoloPower プレスリリースより)

2010年7月12日

SoloPower 社が、ロール・トゥ・ロール法で製造するフレキシブルな CIGS 薄膜太陽電池 SFX module シリーズを発表した。最大出力が 80Wp の SFX1-i module は幅 30cm、長さ 2.9m、重さは 2.3kg である。さらに、260Wp、0.9X2.9m、6kg の SFX1-i3 module、170Wp、0.3X5.8m、3.6kg の SFX2 module 等が順次登場する予定である。

<http://www.solopower.com/solopower-news2-7-12-10.html>

●サンフランシスコ市、有機太陽電池バス停留所を建設(altenergymag.com より)

2010年7月12日

サンフランシスコ市は、グリーンテクノロジー都市の取り組みの一環として、Konarka 社が提供する有機太陽電池「Konarka Power Plastic®」を用いたバス停留所を建設した。

シリコン基板を用いた従来の太陽電池と違い、様々な形状に対応できる。得られたエネルギーは停留所の LED 灯及び Wi-Fi 接続ルータに用いられる。将来的には、都市全体の電力網への展開を計画している。

<http://www.news.illinois.edu/news/10/0715wire.html>

●IMEC、20 μ m 厚の結晶 Si 型太陽電池で効率 16.3%(IMEC プレスリリースより)

2010年7月13日

ベルギーの研究機関である IMEC は 2010年7月13日、エピタキシャル成長を用いて作製した 20 μ m 厚の結晶 Si 型太陽電池で、セル変換効率 16.3%を実現したと発表した。電極の配線パターンを Cu で実装すれば、低品質基板を用いたセルでも既存の結晶 Si 型太陽電池と競争可能な程度に変換効率を高められる (IMEC Energy/Solar Director の Jef Poortmans 氏) という。

http://www2.imec.be/be_en/press/imec-news/epitaxialsemicon.html

●スタンフォード大 Jeong 博士らが、印刷プロセスにより太陽電池用光吸収基板を作製(NanoLettters より)

2010年7月14日

アメリカスタンフォード大学の Cui 博士らのグループは、ワイヤーロッドコーティングを用いてシリカナノ粒子モノレイヤーを作製した。この薄膜をアモルファスシリコンフィルム上に作製すると、光吸収率ならびに撥水性が大幅に向上される。将来は、ロール・トゥ・ロールプロセスによる太陽電池基板の製造技術として応用可能である。

<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl101432r>

●イリノイ大学、印刷ワイヤボンド法を開発(イリノイ大学プレスリリースより)

2010年7月15日

イリノイ大学の研究者は、集積回路と金属パッドを接合する従来のワイヤボンディングに変わるワイヤ接続法を開発した。先端に切り欠きを入れたマイクロピペットを用いて微小のワイヤを印刷することで強固な接続が得られた。

<http://www.news.illinois.edu/news/10/0715wire.html>

●世界初の窓用太陽電池技術を開発(New Energy Technologies, Inc プレスリリースより)

2010年7月20日

New Energy Technologies, Inc 社は独自技術である”SolarWindow “のプロトタイプが完成したと発表した。”SolarWindow “は、有機太陽電池用材料をガラス表面に噴霧して電力を得る技術で、窓に取り付けければ、太陽光と人工光から従来の10倍もの電力を得ることが出来る。

http://www.newenergytechnologiesinc.com/webapp/3188470/New_Energy_to_Unveil_World%E2%80%99s_First-Of-Its-Kind_See_Thru_Glass_SolarWindow%E2%84%A2_Capable_of_Generating_Electricity

●GE 社ら、フレキシブル有機 EL 照明で効率 56lm/W を確認(日経 Tech-On!より)

2010年7月20日

米 General Electric Co.は、同社とコニカミノルタとの共同開発の成果として、塗布法に向けた材料を用いて、発光効率が 56lm/W と高効率でしかも製品として十分な寿命を備えたフレキシブルな白色発光の照明用有機 EL 素子を開発したと発表した。

GE 社とコニカミノルタは、以前からフレキシブルな有機 EL 照明製品を 2011 年に出荷すると発表している。

<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20100720/184289/?ST=fpd>

●有機太陽電池の変換効率の世界最高記録 8.13%を達成(Printed Electronics NOW より)

2010年7月27日

Solarmer Energy, Inc.社は有機太陽電池の変換効率の世界最高記録 8.13%を得たと発表した。2011 年末までに 10%の効率達成を目指す。

http://www.printedelectronicsnow.com/news/2010/07/27/solarmer_energy_breaks_psychological_barrier_with_8.13_percent_opv_efficiency

●USC、グラフェン有機太陽電池を開発(USC プレスリリース)

2010年7月27日

USC(サンフランシスコ大学)の研究グループは、透明なグラフェン太陽電池を開発したと発表した。従来は太陽光の透過目的の為に、透明電極を用いていたが、炭素を原子オーダーの厚さにしたグラフェンを用い導電性と透明性を実現した。

http://uscnews.usc.edu/science_technology/will_t-shirts_soon_power_cell_phones.html

以上