

同時発表：
筑波研究学園都市記者会（資料配布）
文部科学記者会（資料配布）
科学記者会（資料配布）
共同研究先の記者会（資料配布）



1 V で動作する高性能薄膜トランジスタを印刷のみで作製

～「低温焼結塗布型シリカ」による多層印刷を確立～

配布日時：2021年5月27日14時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

株式会社 C-INK

株式会社プリウエイズ

概要

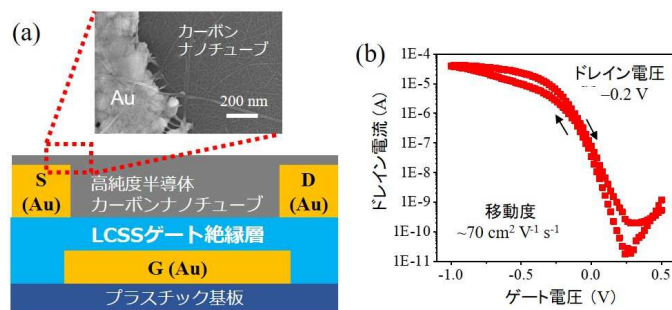
1. NIMS は、低温焼結塗布型シリカ (LCSS) を開発し、高性能な印刷薄膜トランジスタ (TFT) と、素子をつなぐ 3 次元印刷配線の形成を可能にしました。LCSS を絶縁層とし、すべての層を印刷で形成した TFT 素子は、1 V 以下の動作電圧で移動度 $70 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ という世界最高レベルの特性を示しています。この成果は、印刷によるディスプレイや高感度センサといったアプリケーションの開発につながると期待されます。

2. 金属や半導体のインクを用いて印刷プロセスによって電子回路を形成する試みは、「プリントドエレクトロニクス」として広く開発されてきました。印刷電子回路の実用化には、印刷による高性能な TFT 素子と、素子間をつなぐ 3 次元配線が不可欠ですが、TFT 素子や回路を印刷のみで形成するのは難しく、また、印刷によって作製した素子は動作速度が遅く、動作電圧が高いという問題がありました。

3. 今回、研究チームは、プリントドエレクトロニクス向け層間絶縁材料として、塗布プロセスによる成膜が可能で、 90°C で焼結できる低温焼結塗布型シリカ (LCSS) を開発し、印刷のみを用いて高性能な TFT 素子と多層印刷配線を作製可能としました。多層印刷配線は、ビアホールを介した層間の良好な通電が可能です。全印刷 TFT は、1 V 以下の動作電圧で移動度 $70 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ という世界最高レベルの特性を示しています。

4. LCSS は熱に弱い材料にも形成できるため、フレキシブルな材料にも適用可能であることから、ウェアラブルデバイスへの応用が特に期待できます。プリントドエレクトロニクスの一層の普及に向けて、微細印刷技術と材料の社会実装を目指します。

5. 本研究は、NIMS 機能性材料拠点プリントドエレクトロニクスグループの三成剛生グループリーダー、孫晴晴ポスドク研究員（現鄭州大学准教授）、分子機能化学グループの坂本謙二主席研究員、鄭州大学の刘旭影教授、中国科学院の趙建文教授、株式会社 C-INK の金原正幸代表取締役社長、株式会社プリウエイズ（代表：川島勇人）らにより、物質・材料研究機構センサ・アクチュエータ研究開発プロジェクトの一環として行われました。また、科研費基盤研究 (B)「サブミクロンスケール選択的金属化プロセスによる革新的 3 次元実装技術の開発」の支援を受けました。本研究成果は、2021 年 5 月 21 日に独科学誌「Small Methods」にオンライン掲載されました。



図：(a) LCSS をゲート絶縁層に用いた全印刷 TFT。

(b) 全印刷 TFT の電気特性。

研究の背景

既存の半導体製造プロセスと比較して、「プリントドエレクトロニクス⁽¹⁾」は簡便・低コストであり、フレキシブル化も容易なため、次世代の製造技術として注目されています。印刷を用いて電子回路を形成するためには、演算を行うスイッチング素子である薄膜トランジスタ (TFT)⁽²⁾と、素子間をつなぐ3次元配線の印刷技術が不可欠です。一方で、多層の印刷を正確に行う技術が要求されること、TFTのすべての層を印刷で形成することが難しいこと、印刷で作製したTFT素子の性能が低いことが、大きな課題となっていました。NIMSにおいても、全印刷プロセスによる有機トランジスタ素子⁽³⁾の開発を行ってきましたが、10V以上であった動作電圧の低減が課題でした。

研究内容と成果

今回、研究チームは、低温焼結塗布型シリカ (Low-temperature Catalyzed Solution-processed SiO₂: LCSS) を絶縁層として用いることで、印刷による3次元的な多層配線と、これまでになく高性能な全印刷TFT素子を製造することに成功しました。LCSSは焼結温度が90°Cという低温のため、ガラスやシリコンウェハはもちろんのこと、プラスチックフィルムやセルロースナノペーパーの表面にまで絶縁層を形成することができます (図1)。

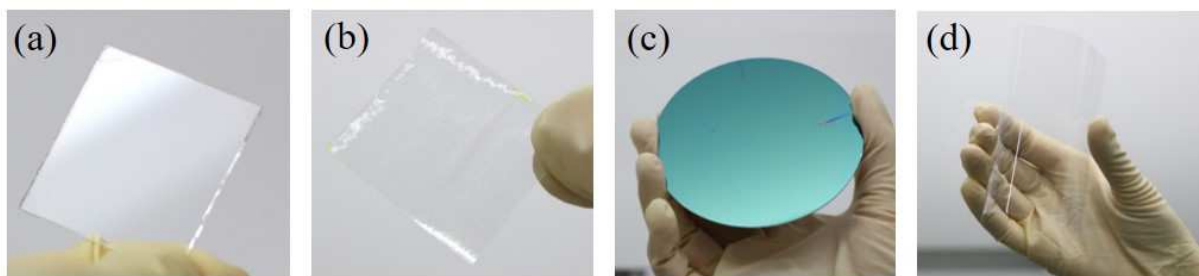


図1 LCSSを様々な基板に成膜したところ。(a) ガラス基板、(b) セルロースナノペーパー、(c) シリコンウェハ、(d) プラスチックフィルム。

NIMSが開発している微細印刷技術 (プレスリリース「2次元表面アーキテクニクス」による微細印刷エレクトロニクスを確立」参照) を応用し、LCSSを絶縁層とした多層配線を形成しました。層間はビアホール⁽⁴⁾によって電気的な接続が可能です。1MHzまでの信号は、層間をロスすることなく伝達可能であることを検証済みです (図2)。

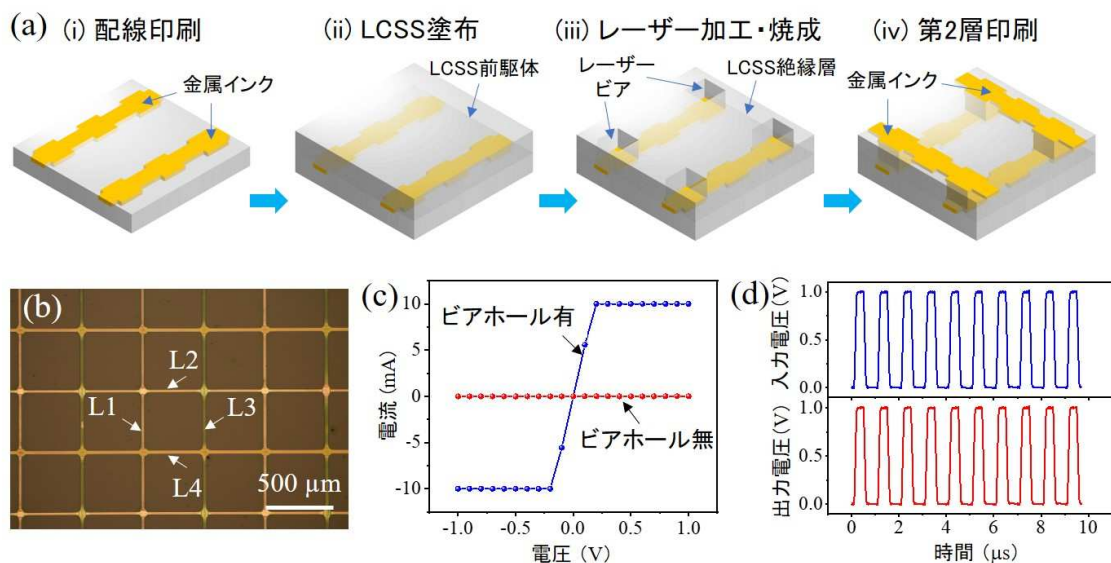


図2 (a)LCSS絶縁層を用いた多層印刷配線プロセスの模式図。(b)LCSSを絶縁層として、線幅15 μm の印刷配線を4層形成したところ。(c)ビアホールを介した電流値の測定。0.2Vの印可で10mAを超える電流を流すことができる。(d)ビアホールを介した電圧パルスの伝達特性。

LCSS をゲート絶縁層に用いて、高性能な印刷 TFT 素子を形成しました。ソース・ドレイン、ゲート電極は金属ナノインクによる印刷、半導体層として高純度半導体単層カーボンナノチューブ (sc-SWCNT) ⁽⁵⁾ を印刷しています。すべての層を印刷でパターニングすることによって、素子間を分離しクロストークを抑制します。すべての層を印刷・溶液プロセスで形成した TFT 素子として、これまでで最高の移動度 ⁽⁶⁾ ($\sim 70 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$) と低電圧駆動 (1 V) を実現しました。これは、LCSS 内部には絶縁性能に影響しない微量の不純物が存在し、電荷の蓄積能力を高めているためと考えられます (図 3)。

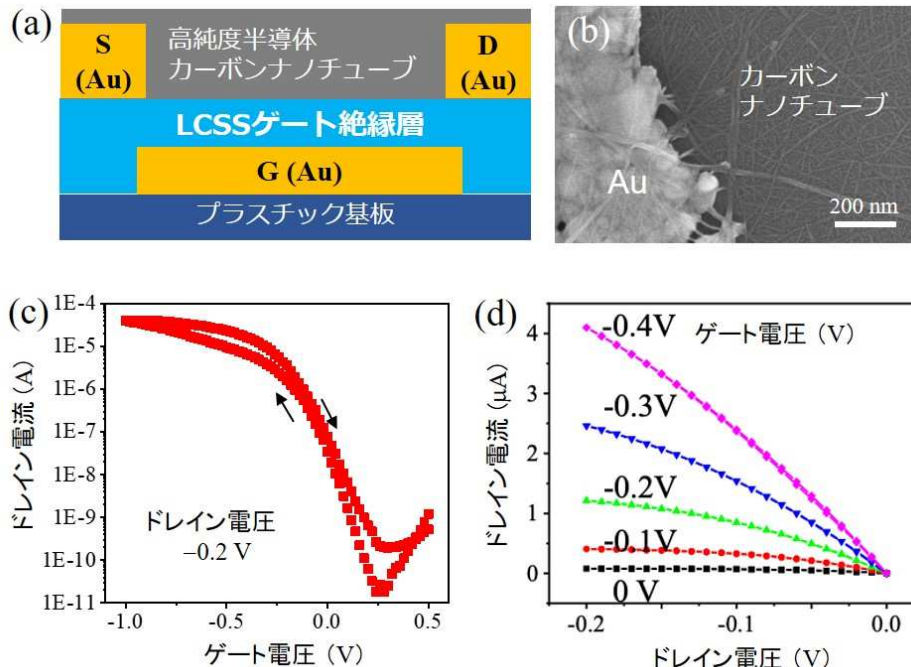


図 3 (a) 全印刷 TFT 素子の模式図。電極は金ナノ粒子の印刷で形成し、半導体層として単層カーボンナノチューブを印刷した。(b) 印刷した Au ナノ粒子電極とカーボンナノチューブの界面の走査電子顕微鏡 (SEM) 像。(c) 全印刷 TFT 素子の伝達特性。(d) 全印刷 TFT 素子の出力特性。

今後の展開

回路を構成する TFT 素子と 3 次元配線が作製できたことで、電子ペーパーやフレキシブルディスプレイ等への応用が期待されます。1 V 以下の低電圧で動作させることができるため、モバイル式バッテリーでも無理なく駆動することができます。本研究成果と NIMS で開発している微細印刷技術 (プレスリリース「2 次元表面アーキテクニクス」による微細印刷エレクトロニクスを確立 参照) を組み合わせることで、さらに高密度な 3 次元回路の形成が可能になります。また、NIMS では、使い捨てチップ上の印刷 TFT 素子によって、化学物質を検出するモバイル式センサ素子の開発を行っており、今回の成果によって開発が加速できる見込みです。プリンテッドエレクトロニクスの一層の普及に向けて、印刷で作製した TFT 素子と電子回路の社会実装を目指します。

掲載論文

題目： Layer-By-Layer Printing Strategy for High-Performance Flexible Electronic Devices with Low-Temperature Catalyzed Solution-Processed SiO₂

著者： Qingqing Sun, Tianqi Gao, Xiaomeng Li, Wanli Li, Xiaoqian Li, Kenji Sakamoto, Yong Wang, Lingying Li, Masayuki Kanehara, Chuan Liu, Xinchang Pang, Xuying Liu, Jianwen Zhao, and Takeo Minari

雑誌： Small Methods

掲載日時： 2021 年 5 月 21 日

用語解説

(1) プリンテッドエレクトロニクス

金属ナノ粒子や半導体分子をインク中に分散させ、塗布・印刷プロセスによってパターンニングを行い、電子回路や半導体デバイスを製造する技術。

(2) 薄膜トランジスタ

ゲート電極に電圧を印可することで半導体層に電荷を蓄積し、ソース・ドレイン電極間に流れる電流値を変調させる電子素子。オンオフのスイッチング素子としても使うことができ、ディスプレイの画素表示等に多く用いられる。

(3) 有機トランジスタ素子

半導体として有機分子を用いた薄膜トランジスタの総称。

(4) ビアホール

プリント配線基板や半導体パッケージで、多層配線の層間に貫通孔を形成し、めっき等を用いて電氣的に接続したもの。

(5) 単層カーボンナノチューブ

炭素の六員環ネットワークで構成され、ナノスケールの直径を持つ筒状の物質（カーボンナノチューブ）のうち、層が一つだけのもの。半導体として用いられる。

(6) 移動度

物質中を電子（または正孔）が移動する速度のこと。薄膜トランジスタの性能を示す指標として用いられる。

本件に関するお問い合わせ先

（研究内容に関すること）

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点 プリンテッドエレクトロニクスグループ
グループリーダー 三成 剛生（みなり たけお）

E-mail: MINARI.Takeo@nims.go.jp

TEL: 029-860-4918

URL: <http://www.nims.go.jp/group/minari/>

株式会社 C-INK

代表取締役社長 金原 正幸（かねはら まさゆき）

E-mail: info@cink.co.jp

URL: <http://www.cink.jp/>

株式会社プリウエイズ

代表取締役社長 川島 勇人（かわしま はやと）

E-mail: info@priways.co.jp

URL: <http://priways.co.jp/>

（報道・広報に関すること）

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp