



窓ガラスがメモリーになる？ —新しい情報表示・記憶装置の開発に成功—

研究成果のポイント

- ・無色透明⇔黒色の色変化で情報を表示・記憶し、同時に電気を通す⇔通さない（＝電子情報）を記憶し、読み出すことが可能な装置。
- ・室温で、安価に製造でき、大面積化が容易。
- ・窓ガラスなどに情報を表示・記憶・読み出すことが可能。

研究成果の概要

「電子カーテン」として最近注目を浴びているエレクトロクロミック材料に、薄膜トランジスタ構造を適用することで、無色透明⇔黒色の色変化で情報を表示・記憶し、同時に電気を通す⇔通さない（＝電子情報）を記憶し、読み出すことが可能な、新しい情報表示・記憶装置の開発に成功しました。本装置は、室温で製造できることから、安価で、大面積化が容易です。例えば、窓ガラスに情報を表示し、記憶する装置として応用することができます。

論文発表の概要

研究論文名：A transparent electrochromic metal-insulator switching device with three-terminal transistor geometry（三端子トランジスタの電極配置を有する透明エレクトロクロミック金属-絶縁体切替装置）

著者：片瀬貴義¹，小野里尚記²，廣野未沙子³，水野 拓⁴，太田裕道¹

（¹ 北海道大学電子科学研究所，² 北海道大学大学院情報科学研究科，³ 北海道大学工学部，⁴ 名古屋大学大学院工学研究科）

公表雑誌：Scientific Reports

公表日：英国時間 2016年5月13日（金）（オンライン公開）

研究成果の概要

(背景)

ボーイング社の 787 型旅客機の「電子カーテン」として応用されたことで注目を浴びた「エレクトロクロミズム」は、「エレクトロクロミック材料」と呼ばれる金属イオンを内包する物質を、電気化学的に酸化・還元することで、材料の色が無色透明⇄黒色のように可逆的に変化する現象です。現在、エレクトロクロミズムは、ガラスの色を无色透明⇄黒色に切り替えて外光の透過率を調節することができるので、旅客機や住宅の窓の「電子カーテン」として応用されている他、夜間の自動車運転中に、ルームミラーに映り込む後続車のヘッドライトの眩しさを和らげるための「防眩ミラー」として応用されはじめており、その市場規模は 2016 年で 15 億ドル（約 1,600 億円）、2023 年には 40 億ドル（約 4,300 億円）を超えると予測されています（出典：米国 n-tech Research）。

1970 年代からエレクトロクロミック材料として知られる酸化タングステン¹は、透明で、電気を通さない絶縁体ですが、電気化学的に水素を内包させることにより、黒色で、電気をよく通す金属になり、水素を引き抜くことで元の透明な絶縁体に戻るというエレクトロクロミズムを示します。

本研究では、酸化タングステンの透明⇄黒色の色変化に加え、絶縁体⇄金属の電気の通しやすさの変化に着目し、電気が通らない絶縁体の状態を情報「0」、電気がよく通る金属の状態を情報「1」とすることで、視覚でとらえられる色変化の情報「透明」「黒」に加え、電氣的に情報「0」と「1」を記憶・読み出すことができる、新しい情報表示・記憶装置の実現に向けて研究に取り組みました（図 1）。

この実現には、従来のエレクトロクロミック技術では解決できない、2 つの問題がありました。一つは、液体（電解液）を用いないこと、もう一つは、エレクトロクロミック装置の電極構造です。

電気化学的な酸化・還元のためには電解液を用いる必要があります。一般的には、電解液が液漏れしないように装置を密封する、または、粘度が高いゲル状の電解液を使用する方法が用いられていますが、微細化が困難であり、そのため高精細化が求められる情報表示装置としては明らかに不適でした。また、情報「0」と情報「1」を読み出すためには、ゲート絶縁体と呼ばれる絶縁体と、ゲート電極、ソース電極、ドレイン電極と呼ばれる 3 つの電極端子を持つ薄膜トランジスタの構造にしなければなりません。従来の装置は、電解液とエレクトロクロミック材料を 2 枚の電極で挟み込む構造であるため、情報「0」と「1」を読み出すための電極を形成することができませんでした。

本研究では、電解液の代わりに水を含んだセメント薄膜をゲート絶縁体として用いることで、上記の 2 つの問題を同時に解決し、無色透明で電気を通さない絶縁体（情報 0）を、黒色で電気をよく通す金属（情報 1）に、室温で、可逆的に変えることで、情報を表示し、記憶する新しい装置の開発に成功しました。本装置は、安価に、室温で作製でき、大面積化も可能なことから、例えば、窓ガラスに情報を表示し、記憶する装置などに応用することができます。

(研究手法)

本研究における最も重要な材料は、水を含んだセメント薄膜です。セメント薄膜とは、直径約 10 ナノメートル（1 ナノメートルは 10 億分の 1 メートル）の孔が多数開いた、アルミン酸カルシウム（化学組成 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 、アルミナセメントの主成分）の厚さ 300 ナノメートルの薄膜です。セメント自身は電気を通さない絶縁体ですが、多数の孔に空気中の水分が自然に吸い込まれ（毛細管現象）、電圧がかかることで孔の中の水が電気分解し、水素を生成するという性質があります。本研究では、このとき生成する水素を、酸化タングステン中に出し入れすることで、無色透明な絶縁体⇄黒色金属の

可逆変化に成功しました。

装置の作製は以下の手順で、すべて室温下で行いました。パルスレーザー堆積法と呼ばれる超精密な薄膜作製手法により、ガラス基板の上に、透明なソース・ドレイン電極（ITO, インジウム・スズ酸化物）を作製し、次いで、エレクトロクロミック材料の酸化タングステン薄膜（厚さ 80 ナノメートル）、アルミン酸カルシウム薄膜（厚さ 300 ナノメートル）、酸化ニッケル薄膜（厚さ 20 ナノメートル）を積層し、最後に、透明なゲート電極（ITO, 厚さ 20 ナノメートル）を堆積させて、情報表示記憶装置を作製しました（図 2）。

（研究成果）

図 3 左に、情報「0」と「1」の記憶・読み出しに関する実験データを示します。室温・空気中で、作製した情報表示記憶装置のゲート電極とソース電極の間に、+2 から +10 ボルトの一定のプラス電圧で電流を 10 秒間ずつ流し、酸化タングステン薄膜に水素を入れたところ、電圧印加前は計測できないほど高かったソース・ドレイン間のシート抵抗（100 メガオーム以上、1 メガは 100 万）が指数関数的に減少し、+10 ボルト印加後には 30 オームに、約 6 桁減少しました。逆に、-2 から -10 ボルトの一定のマイナス電圧で電流を 10 秒間ずつ流し、酸化タングステン薄膜から水素を引き抜いたところ、-10 ボルト印加後には 10 メガオームまでシート抵抗が増加しました。このシート抵抗は繰り返し増減可能であり、印加する電圧の大きさにシート抵抗変化の幅を調節できることが分かりました（図 3 右）。

なお、このシート抵抗の変化は、ファラデーの電気分解の法則に従うことも検証済みです。すなわち、流れた電流と、酸化タングステン薄膜内に入り出した水素イオン濃度が完全に一致することが分かっています。これらの実験データから、本研究の装置で、情報「0」と「1」の記憶・読み出しが可能であることが証明できました。

図 4 左に、電気的に水素を出し入れしたときの装置全体の光透過率の変化を示します（縦軸は光透過率、横軸は光の波長です）。水素を引き抜いた状態では、平均して 60~70%の可視光線が透過するため、装置は無色透明ですが、水素を入れると可視光線の平均透過率が 30%以下に低下して、黒色に変化します（図 4 右は装置の実際の写真）。なお、光透過率の計測を行うために、本研究では 0.4 ミリメートル×0.8 ミリメートルの大きさの装置を用いましたが、本情報表示・記憶装置は、電解液を用いない固体装置であり、密封する必要がないことから、更なる微細化による高精細化が可能です。ガラス基板の上に多数配置することにより、無色透明⇄黒の色調変化を利用した、文字や絵などの情報表示が可能です。

（今後への期待）

本研究の情報表示・記憶装置を用いることにより、例えば、窓ガラスに文字や絵などの情報を表示・記憶することができるようになります（図 5）。本装置は、室温下で製造することができるので、熱に強いガラスだけではなく、熱に弱いプラスチックの上にも作製することが可能です。大面積化が可能なることから、安価に情報表示・記憶装置が製造可能です。

情報の表示・消去に要する時間は約 10 秒であり、情報表示装置としては動作がやや遅いことが課題ですが、材料や装置の構造を改良し、タッチパネル技術と組み合わせることで、真に実用的な情報表示・記憶装置が実現すると期待しています。

お問い合わせ先

所属・職・氏名：北海道大学電子科学研究所 教授 太田 裕道（おおた ひろみち）
TEL：011-706-9428 FAX：011-706-9428 E-mail：hiromichi.ohta@es.hokudai.ac.jp
北海道大学電子科学研究所 助教 片瀬 貴義（かたせ たかよし）
TEL：011-706-9432 FAX：011-706-9432 E-mail：katase@es.hokudai.ac.jp
ホームページ：http://functfilm.es.hokudai.ac.jp

【参考図】

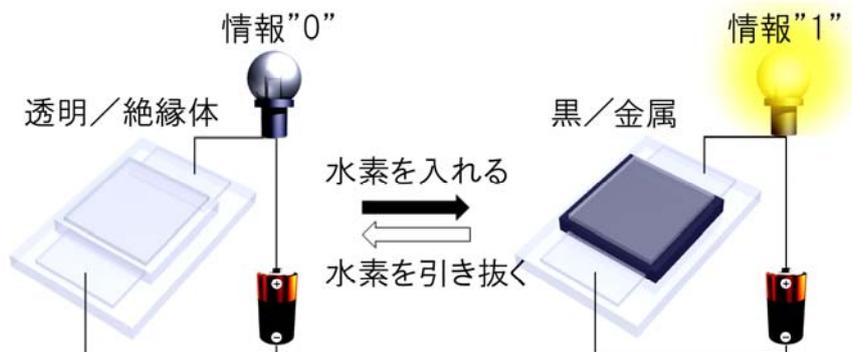


図1 エレクトロクロミズムを利用した新しい情報表示・記憶装置のアイデア

3つの電極端子を持つ薄膜トランジスタ構造の採用により、視覚でとらえられる色変化の情報「透明」「黒」に加え、電気が通らない絶縁体の状態を情報「0」、電気がよく通る金属の状態を情報「1」として、情報を記憶・読み出すことが可能な、新しい情報表示・記憶装置として利用できる。

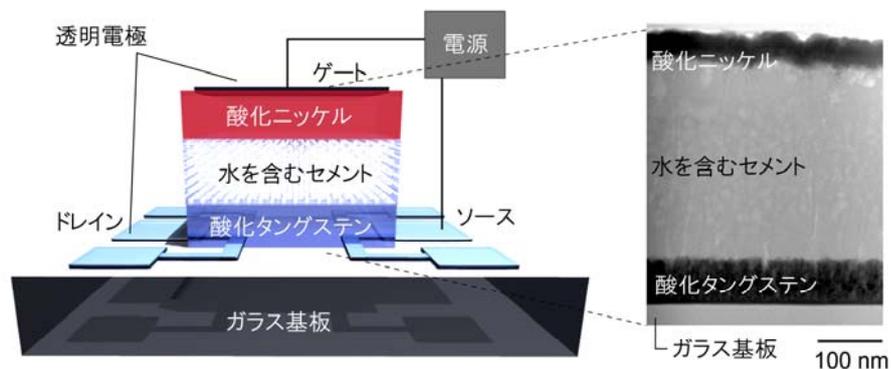


図2 本研究で作製した情報表示・記憶装置の模式図(左)と電子顕微鏡像(右)

ソース、ドレイン、ゲート電極からなる3端子の薄膜トランジスタ構造で、水を含むセメント薄膜をゲート絶縁体として使用した。ゲート-ソース電極間にプラス電圧を印加すると、水を含むセメント薄膜中で水の電気分解が起こり、酸化タングステン中に水素イオンが、酸化ニッケル中に水酸化物イオンが取り込まれ、逆に、マイナス電圧を印加すると水素イオンと水酸化物イオンはセメント中に戻る仕組み。

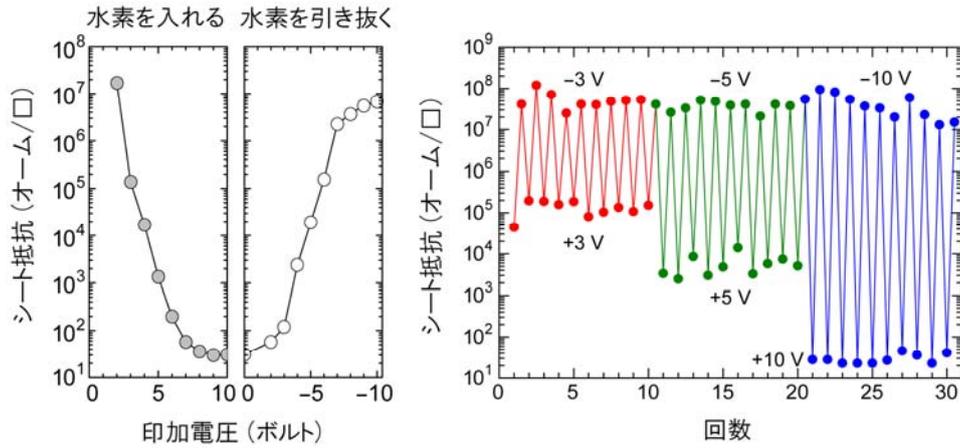


図3 電気的に水素を出し入れしたときの酸化タングステンのシート抵抗の変化

水素が入っていない状態ではシート抵抗が計測できない(100メガオーム以上)絶縁体だが、水素を入れると30オームの金属に変化し、水素を引き抜くと元の絶縁体に戻る(左)。この変化は繰り返し可能で、変化の大きさは印加する電圧によってコントロールできる(右)。

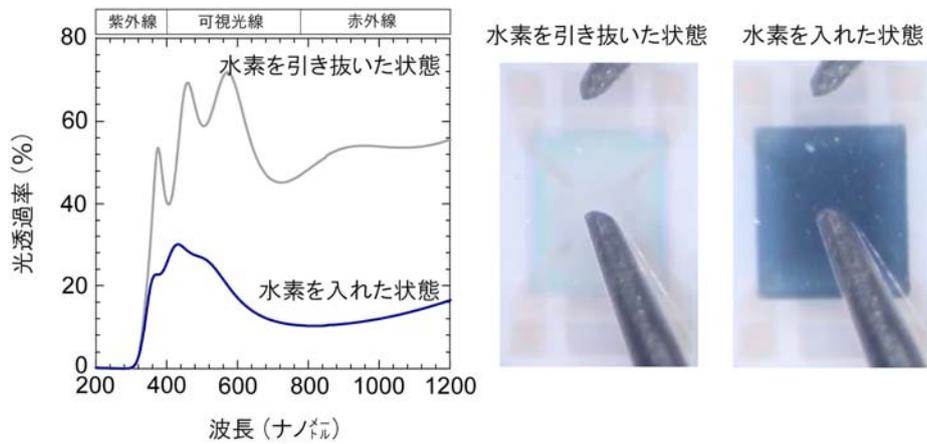


図4 電気的に水素を出し入れしたときの光透過率の変化(左)

水素を引き抜いた状態では平均60~70%の可視光線が透過するため、無色透明だが、水素を入れると可視光線の透過率が30%以下に低下して、黒色に変化する。右は実際の装置の写真。

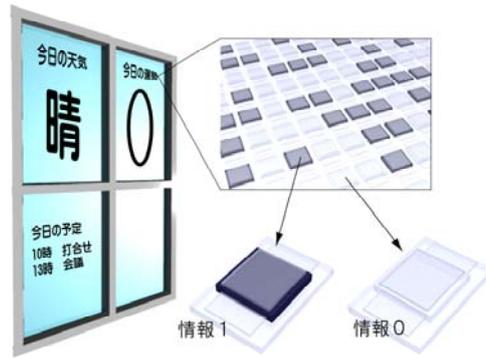


図5 本研究の情報表示・記憶装置の期待される用途例

窓ガラスに情報を表示し、その情報を電子化することが可能なので、将来、窓ガラスをメモリーとして利用することが可能になるかもしれない。