



オンデマンド赤外線&電流制御デバイスを実現

研究成果のポイント

- ・室温管理の妨げとなる赤外線透過率と、導電率を同時に制御可能な全固体薄膜デバイスを実現。
- ・エアコンなどの電気スイッチを、オンデマンド制御可能なスマートウィンドウへの応用を期待。

研究成果の概要

窓ガラスから入ってくる赤外線の透過率を制御すると同時にエアコンを制御できる「スマートウィンドウ」があれば、室内の冷暖房効率が飛躍的に高められ、省エネルギー化に貢献できると考えられます。クロミック材料^{注1}を利用したスマートウィンドウの開発が行われてきましたが、従来のデバイスでは透過率を切り替えるために高温での熱処理や電解液が必要であったため、実用化は限定的でした。本研究チームは、スポンジのように水を含むガラスをクロミック材料である VO_2 薄膜に貼りつけた全固体薄膜デバイスを作製しました。電圧を印加することでガラス中の水を電気分解し、生成するプロトン (H^+ イオン) を VO_2 薄膜に脱挿入することで赤外線を透過する絶縁体と赤外線を遮断する金属の切り替えに成功しました (図 1)。室温動作可能で漏液の心配がないことから、スマートウィンドウへの応用が期待できます。

本研究成果は、独科学誌アドバンスド・エレクトロニック・マテリアルズのオンライン速報版で 2015 年 6 月 1 日 (月) に公開されました。

論文発表の概要

研究論文名 : Room-temperature-protonation-driven on-demand metal-insulator conversion of a transition metal oxide (室温プロトン化による遷移金属酸化物のオンデマンド金属—絶縁体変換)

著者 : 片瀬貴義¹, 遠藤賢司², 藤平哲也³, 幾原雄一³, 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東京大学総合研究機構)

公表雑誌 : Advanced Electronic Materials

公表日 : ドイツ時間 2015 年 6 月 1 日 (月) (オンライン公開)

研究成果の概要

(背景)

現在、建物における冷暖房や照明負荷が大きなエネルギー損失となっており、熱の原因となる赤外線透過率制御とエアコンのスイッチ機能を備えたスマートウィンドウを開発できれば、消費電力の大幅な低減化が期待できます。光透過率と導電率を同時にスイッチするためには、エレクトロクロミック材料が必要で、既に航空機の窓などに応用されている酸化タングステン (WO_3) が知られていますが、 WO_3 はエレクトロクロミズム^{注2}により、赤外線透過率と同時に可視光透過率も減少してしまうため、明るい光は取り入れながらも赤外線透過率のみスイッチング可能な調光ガラスを実現することはできません。

そこで本研究チームは二酸化バナジウム (VO_2) に着目しました。不純物を全く含まない VO_2 は室温では絶縁体であり、可視光・赤外線を透過しますが、 VO_2 中にプロトン (H^+ イオン) を取り込ませること (プロトン化^{注3}) で金属化し、赤外線だけを遮断することが可能です。 VO_2 のプロトン化・脱プロトン化を利用すれば可視光は透過したまま、赤外線だけを透過・遮断可能な機能性調光ガラスが実現可能ですが、 VO_2 のプロトン化には、水素雰囲気下での高温熱処理や電解液中における電気化学処理が必要で、実用化し難い問題があり、これまで固体の薄膜デバイスとして利用された例はありませんでした。

(研究手法)

本研究チームは、スポンジのように「水」を含むナノ多孔質 C12A7 ガラス (CAN) をゲート絶縁体として VO_2 薄膜 (厚さ 20nm) に貼りつけた薄膜トランジスタ構造 (図 2) を作製しました。水との親和性の高い C12A7 薄膜中のナノ細孔 (直径 10~20nm) に大気中の水分が自動的に取り込まれることで、水を吸い込んだ多孔質ガラスが実現されます。この多孔質ガラス CAN を厚さ 200nm 堆積させ、金属チタンをソース・ドレイン・ゲート電極とするトランジスタ構造を作製しました。水を含んだ CAN をチタン電極と VO_2 薄膜で挟んだナノ平行平板に電圧を加えることで、水の電気分解^{注4} で発生する H^+ イオン・ OH^- イオンと強力な電界によって、室温で VO_2 薄膜のプロトン化・脱プロトン化を試みました。ゲート電極側を正電圧にすれば H^+ が VO_2 層に (H^+ 挿入)、負電圧を印可すれば OH^- が VO_2 層へ (H^+ 脱抜) 引き付けられることが期待されます。

(研究成果)

正の電圧をゲート電極に印加することで、CAN 薄膜中の水を電気分解し、生成する H^+ を VO_2 薄膜中に挿入することでプロトン化しました。その結果、5 ボルト以上の正電圧を加えることで、 VO_2 薄膜の電気抵抗と単位温度差あたりの熱起電力^{注5} (絶対値) が劇的に減少することが分かりました。このことは、プロトン化によって絶縁体 (VO_2) から金属 (H_xVO_2) に向かって変化していることを示します。正と負の電圧をゲート電極に印加して、 VO_2 薄膜トランジスタのプロトン化・脱プロトン化による可逆動作 (各電圧の印加時間は 1 分) を行ったところ、プラスマイナス 20 ボルトのゲート電圧を交互に印加することで、可逆的な絶縁体-金属変換 (抵抗変化率約二桁) が実現可能であることがわかりました。また、プロトン化によって、絶縁体-金属変換と同時に構造変化も起きていることを明らかにしました。

以上のことから、高温熱処理や電解液を全く必要とせずに、赤外線を透過する絶縁体と赤外線を遮断する金属の切り替えが可能な全固体の薄膜デバイスの作製に成功したと言えます。

(今後への期待)

本研究における VO_2 薄膜トランジスタはガラス基板上でも実現可能であり、室温動作可能で漏液の

心配がないため、従来に比べて非常に実用化し易くなると考えられます。開発した全固体薄膜デバイスは、家や車などの窓ガラスへの応用を考えています。例えば、明るい日光は取り入れながら、室温管理の邪魔者である赤外線の透過率と、エアコンなどの電気スイッチを、オンデマンド制御可能なスマートウィンドウに応用することで、冷暖房による温度調節で無駄に消費していたエネルギーを省け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

助教 片瀬貴義（かたせ たかよし） E-mail : katase@es.hokudai.ac.jp

教授 太田裕道（おおた ひろみち） E-mail : hiromichi.ohata@es.hokudai.ac.jp

TEL : 011-706-9431 FAX : 011-706-9431

ホームページ : <http://functfilm.es.hokudai.ac.jp>

(参考図)

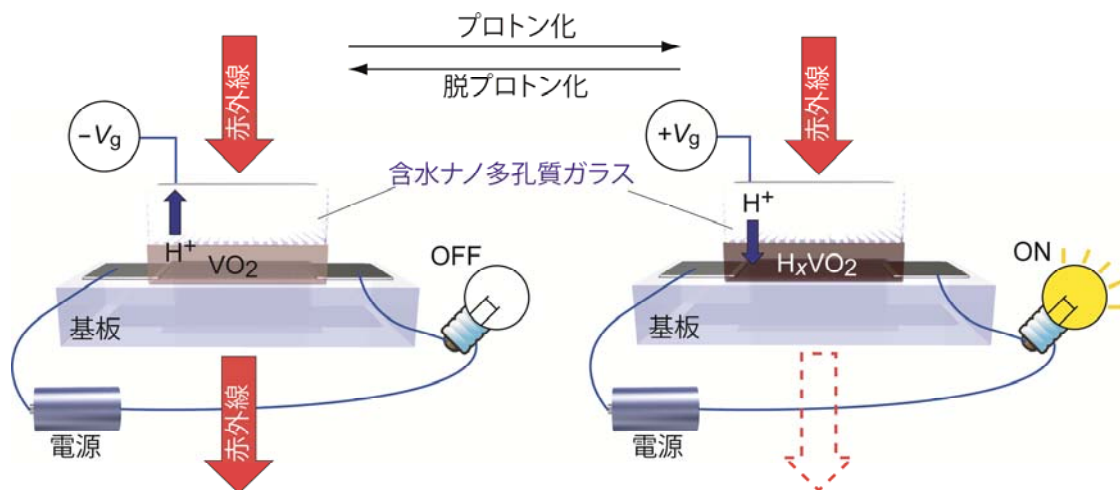


図1：赤外線透過率と電流を同時にスイッチ可能な全固体薄膜デバイスの模式図

正電圧を印可することで、 VO_2 薄膜がプロトン化 ($H_x VO_2$) して、赤外線を遮断すると共に電流が流れる (ON 状態) が、負電圧を印可することで脱プロトン化し、赤外線を透過すると共に電流が流れなくなる (OFF 状態)。

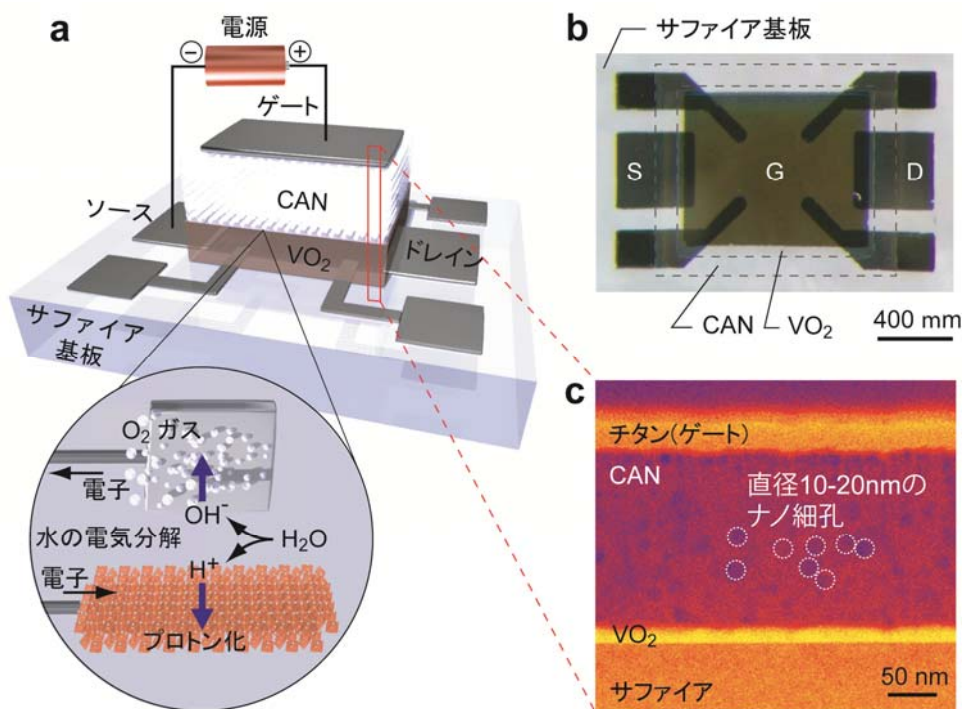


図 2： (a) 含水多孔質ガラス (CAN) をゲート絶縁体に用いた VO₂ 薄膜トランジスタの模式図

電圧をゲート電極に印加することで、CAN 薄膜中で水を電気分解し、生成する H⁺ を VO₂ 薄膜中に導入することでプロトン化する。(b) VO₂ 薄膜トランジスタの写真、(c) 透過型電子顕微鏡で観察した VO₂ 薄膜トランジスタの断面像。CAN 中に直径 10-20nm のナノ細孔が存在し、大気中の水分が自動的に取り込まれることで、固体の含水多孔性ガラス (スポンジ) が実現する。

(用語解説)

注 1) クロミック材料：

光・熱・電気などの外部刺激によって、可逆的な色の変化を示す物質のこと。

注 2) エレクトロクロミズム：

電氣的に引き起こされる可逆的な酸化還元反応によって着色したり消えたりする現象のこと。WO₃ のエレクトロクロミズムを利用した調光ガラスがボーイング 787 の窓に搭載されたことで話題になっている。

注 3) プロトン化：

物質中にプロトンを取り込ませること。

注 4) 水の電気分解：

純粋な水はほとんど電気を通さない絶縁体であるが、1.23 ボルト以上の電圧を加えると、 $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$ で表されるように電離する。

注 5) 単位温度差あたりの熱起電力：

熱電能ともいい、絶縁体から金属への大幅な電子構造変化に対して、敏感に変化する。ここでは、熱電能 (絶対値) が、絶縁体 VO₂ の 200 マイクロボルトからプロトン化した VO₂ (H_xVO₂) の 35 マイクロボルトに向かって減少していることから、プロトン化によって絶縁体から金属に向かって変化していることが分かった。