東北大学
TOHOKU UNIVERSITY

Press Release

2026 年 11 月 12 日

報道機関　各位

国立大学法人東北大学

緑光でスイッチング効果を持つ電界効果型光トランジスタを開発

【発表のポイント】

- アモルファス（注 1）のリン酸エステル化（注 2）セルロースナノファイバー(Amorphous phosphorylated cellulose nanofibers (APCNF))を用いて、三極金属半導体電界効果型トランジスタ（注 3）（MESFET）デバイスを作製したところ、電気伝導度が従来の CNF より 6 桁向上しました。
- n 型半導体（注 4）の MESFET に緑光を照射するとオン/オフのスイッチング特性（注 5）が得られました。
- 森林資源に恵まれた日本初のバイオ素材として、「光電融合」（注 6）への利用が期待されます。

【概要】

バイオマス化合物であるセルロースは地球上での生産量が最も多い天然の化合物です。カーボンニュートラルな素材であるため、地球温暖化対策の切り札として期待されています。しかしその用途は、機械的、熱的、音響的、食品的特性に限定されているのが現状です。

東北大学未来科学技術共同研究センターの福原幹夫シニアリサーチフェローと同大学院工学研究科の小野崇人教授、静岡大学工学部の藤間信久教授、王子ホールディングス株式会社らの研究グループは共同で、APCNF を利用したショットキー接合（注 7）により n 型バイオ半導体 MESFET を作製したところ、負のゲート電圧で MESFET を持たない場合に比べて電気伝導度の 6 桁の増加と、緑光（波長 : 490-550nm）の照射によりスイッチング効果が発現することを見出しました。また電子スピン共鳴法（注 8）による測定から伝導電子はヒドロオキシラジカル($^{9}OH^{\bullet}$)基（注 9）の不対電子ラジカルに起因することを明らかにしました。

本研究成果は、2026 年 11 月 4 日に米国物理学会協会（AIP）のオープンアクセスジャーナル AIP Advances に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

半導体は産業のコメと言われ、現代社会において幅広い分野の必須素材として利用されています。この半導体はシリコン(Si)に代表される真性半導体（注 10）とガリウム・ヒ素(GaAs)やπ共役ポリマー（注 11）のような化合物半導体に代表されるものの 2 つに大別されます。これらは鉱物から金属精錬したものや人工の石油化合物由来であり、生産工程での所要エネルギーや環境負荷が大きいことが指摘されています。

著者たちは、絶縁体と認識されている紙・セルロース、キチン・キトサンをナノサイズの微細構造体とした CNF や ChNF を用いて、電荷分布や電子移動度を計測し、高電圧短時間充電による高蓄電特性と電圧制御型 N 型負性抵抗を示す n 型半導体の諸特性やトランジスタ特性を見出してきました。

今回の取り組み

本研究では、透光度の高い APCNF を用いて n 型半導体の諸特性やトランジスタ特性について解析しました。

始めに、直径 4.46 nm の APCNF を用いて作成した厚さ 1μm のシートの波長域 400～800 nm における光透過度と屈折率を計測しました。その結果を図 1 に示します。波長が 400nm から 800nm まで増加するに従って、透過率は 0.90 から 0.92 まで上昇して高透光性を示す一方、屈折率は 1.58 から 1.52 まで減少しました。このような変化は代表的な光学材料である石英と同等であり、光制御トランジスタにとって重要な特質です。

この APCNF を図 2 に示すようなアルミニウム(Al)電極のソースとドレイン間に埋め込み金(Au)のゲート電極で接触された三極 MESFET デバイスを作製し、ゲート変調によるドレイン電流 Id を測定しました。図 3 は Vd = 1.0 V における Id-Vg 伝達特性であり、V_g = 4.1 V において 2.09 mA が得られました。この値は電気伝導率 0.61 mS/m と計算され、機械的解繊 CNF の電気伝導度より約 6 桁大きい値を示しました。

図 2 の MESFET に接する APCNF 下部より波長 λ= 300～800 nm の光を照射し、ゲート電圧を-5V から+5V まで変調させ、光の波長を 350 から 800nm まで変化させた時の I_d -λ 伝搬曲線を図 4 に示します。I_d はゲート電圧に関係なく緑光の波長領域(490–550 nm)付近で 1/32 まで減少するスイッチング現象が現れました。緑光照射によるスイッチング現象は、光に不透明な Si や無機化合物では現れない現象です。このような現象が起こる原因として、ヒドロオキシラジカ

ル(^{9}OH•)基における酸素原子からの緑光照射による自由電子の消失によりAPCNF 中の空乏層の大きさが増加した結果であると考えられます。

なお電子伝導の起源は電子スピン共鳴法測定から^{9}OH•ラジカルであることが分かり、その厳密な場所は第一原理計算(注12)からリン酸エステル結合の酸素原子に優先的に局在したラジカル電子であることが推定されました。

また、ホール係数測定より電子移動度は 16.33 cm^2/Vs であり、大気中光電子吸収分光装置による測定で仕事関数は 5.31 eV でした。化合物半導体の代表的な 1 つに挙げられるπ共役ポリマーでは、電子移動度は 0.08-2.5cm^2/Vs、仕事関数は 0.47-0.65 eV であることから、今回作製した三極 MESFET デバイスは、電子移動度では約 100 倍、仕事関数では約 10 倍の性能を持つことが分かりました。

<u>今後の展開</u>

本研究で実証された「緑光によるスイッチング現象」は、従来のシリコン半導体が抱える電力消費と発熱の課題を根本から解決する可能性を秘めています。特に、膨大な電力を消費するデータセンターにおいて、電気信号を介さず光信号のまま直接トランジスタを制御できる、次世代の「光電融合」情報処理基盤への応用が考えられます。

加えて、本デバイスは透明かつ環境負荷の低い天然由来素材を用いているため、窓ガラスやディスプレイと一体化した情報端末や、生体に埋め込める安全なバイオセンサーなど、従来の無機半導体では困難だった「バイオオプトエレクトロニクス(注13)」の実現も可能にします。

今後、これらの社会実装に向け、APCNF を大面積で均一に処理する「量産化プロセスの確立」という製造上の課題に取り組むことで、光電融合領域の新たな次世代産業の創出を牽引していきます。

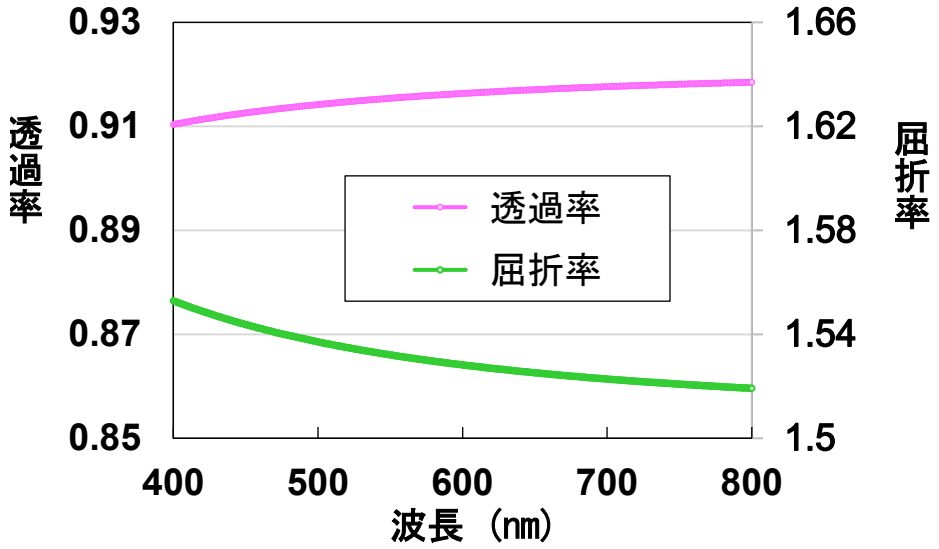


図 1. 400nm～800 nm の波長領域における光透過率と屈折率の測定結果。波長が増加するに従って、透過率は 0.90 から 0.92 まで上昇する一方、屈折率は 1.58 から 1.52 まで減少した。

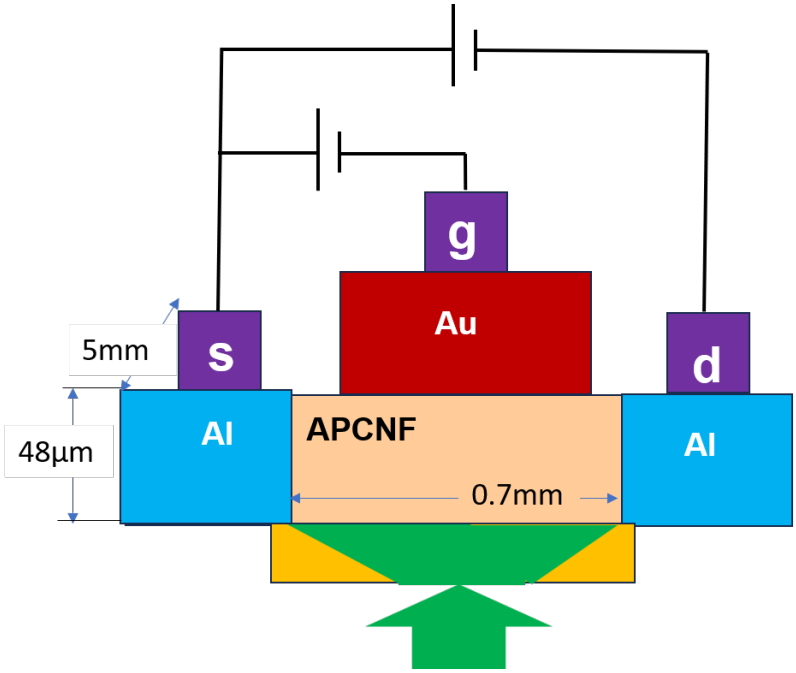


図 2.　4.46nm 径の APCNF が Al のソース、ドレイン電極間に埋め込まれ Au のゲート電極と接合されたショットキー型 MESFET デバイス(0.7-5-0.048 mm)の下部より 350～800 nm の光を照射する装置（s：ソース、d：ドレイン、g：ゲート電極）。

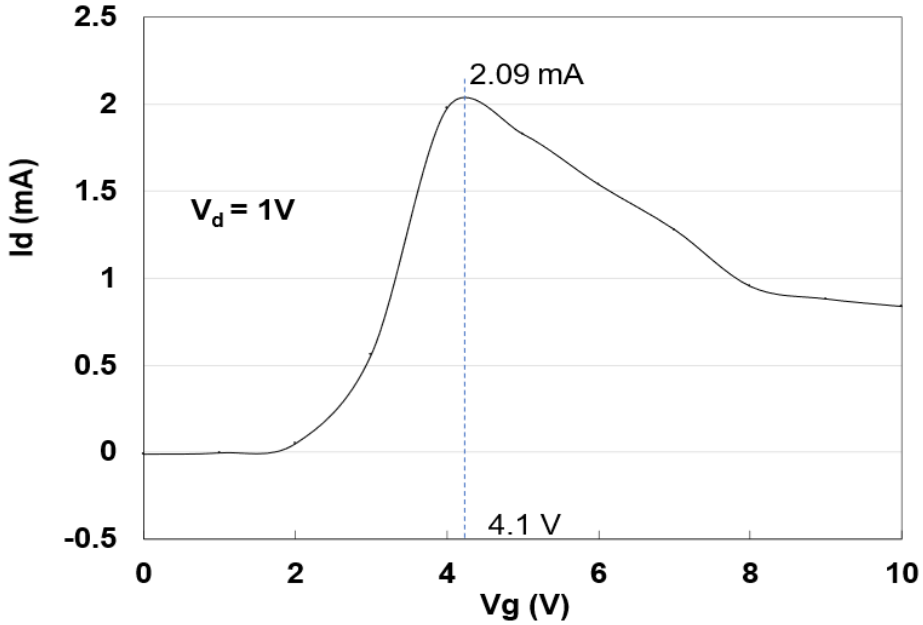


図 3.　APCNF MESFET の V_d = 1.0 V における I_d-V_g 伝達特性結果。V_g = 4.1 V において 2.09 mA の結果が得られた。

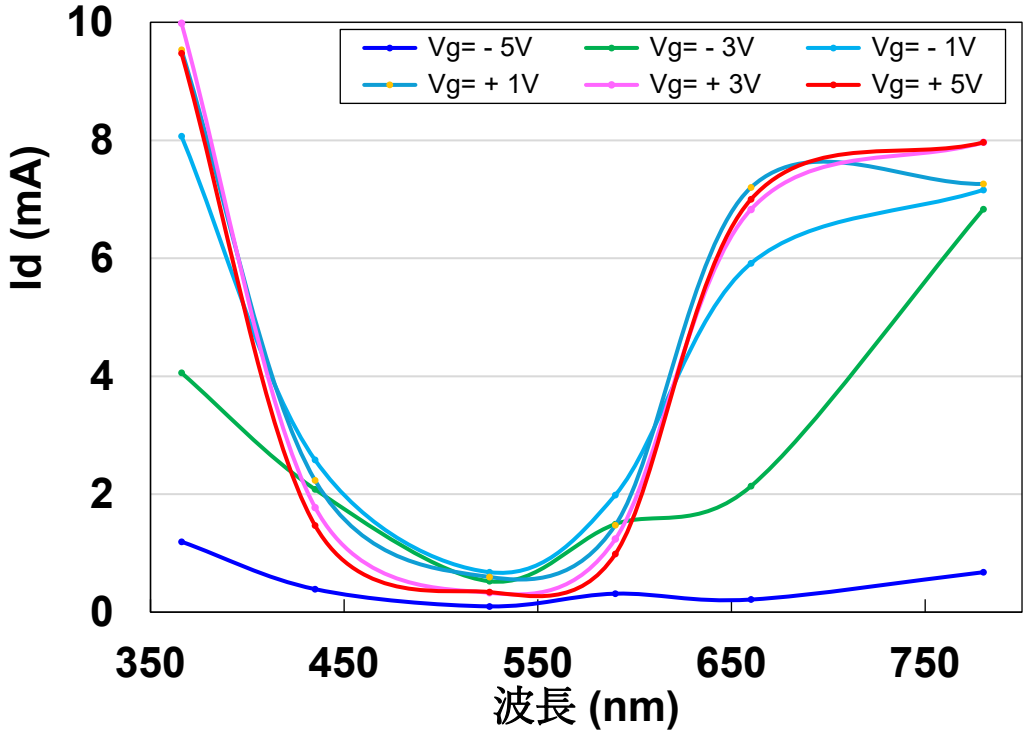


図 4.　ゲートを-5 V から+5 V まで変調させ、λ を 350～800nm まで照射した時の電圧制御 I_d-V_{ds} 特性結果。I_d が緑光の波長(490–550 nm)領域付近で 1/32 のスイッチング効果が現れた。

【用語説明】

注1.　アモルファス：ガラスのように、元素の配列に規則性がなく全く無秩序な材料。結晶材料とは異なる種々の特性を示す。

注2.　リン酸エステル化：有機リン化合物のうちリン酸($O=P(OH)_3$)とアルコールが脱水縮合したものをエステルと称し、このリン酸官能基の 1〜3 個がセルロース分子の(OH)基に置き換わること。

注3.　金属半導体電界効果型トランジスタ（metal-semiconductor field effect transistor: MESFET）：電界効果トランジスタの一種。ショットキー接合性の金属をゲートとして半導体上に形成した構造を持つ。

注4.　n 型半導体：負の電荷を持つ自由電子がキャリヤーとして移動することで電流が生じる半導体。例えば、4 価の Si に微量の 5 価元素の P や As を添加すると一つ余剰の電子が生じ色々な特性が発現。

注5.　スイッチング特性：半導体素子が導通状態（on）と遮断状態（off）を切り替える能力。リレーのような単純なスイッチでは実現できない、連続的な信号増幅が可能。光を通さない半導体では不可能な現象で、透光度の高い PCNF のみ可能。

注6.　光電融合：光信号を扱う回路と電気信号を扱う回路を融合すること。コンピュータ内部の電気信号を光信号に置き換え、省エネ・高速・大容量・低遅延を実現する技術。本研究の場合、光の波長による電子のスイッチング効果。

注7.　ショットキー接合：金属の仕事関数Φm に比べ小さい仕事関数Φn を持つ n 型半導体(または p 型半導体)と金属を接触させたときの接合状態。

注8.　電子スピン共鳴法：ラジカル（不対電子）を持つ試料を磁場中に置き、マイクロ波を照射し、ラジカルが特定のエネルギーのマイクロ波を吸収して励起する現象（共鳴）を利用して、ラジカルの種類や量を測定する手法。スペクトルのピーク中心位置から決定される「g 値」はラジカル固有の値をとり、本測定では g=2.0052 という値から、ヒドロキシ基の酸素原子（^{9}O）に誘起されたラジカル（$^{9}OH^{\bullet}$）であると判定。

注9.　ヒドロオキシラジカル($^{9}OH^{\bullet}$)基：ヒドロ（水酸）($O^{\bullet}H$)基に対応するラジカルで、生体中、活性酸素と呼ばれる分子種で最も反応性が高く、最も酸化力が強い。

注10. 真性半導体：シリコン（Si）やゲルマニウム（Ge）などのように不純物を全く含まない、または不純物の影響を無視できるほど純度の高い半導体。

注11. π共役ポリマー：単結合と多重結合が交互につながり、非局在化した電子（π電子）を有する化合物。π電子は主鎖上を自由に動き回ることが出

来るため、光吸収・発光特性、電導性、磁性など特異的な性質を有する。しかし電子や正孔のキャリヤー移動度が非常に小さく用途は限定的。

注12. 第一原理計算：量子力学に基づいて物質の性質を計算する手法。

注13. バイオオプトエレクトロニクス：バイオ素材特有の機能を活用して、光学と電子工学を融合させて新たな技術やデバイスを創出する学際的な領域。

【論文情報】
タイトル：Green-light switching of Schottky-gated transistors made from phosphorylated cellulose nanofibers
著者：Mikio Fukuhara, Tomonori Yokotsuka, Takahito Ono, Koshiro Yaegashi, Masahiko Kumadaki, Nobuhisa Fujima, and Kentaro Kishi
*責任著者：東北大学未来科学技術共同研究センター　シニアリサーチフェロー　福原幹夫
掲載誌：AIP Advances **16**,115008(2026)
DOI：10.1063/5.0353127
URL：https://doi.org/10.1063/5.0353127

【問い合わせ先】
（研究に関すること）
東北大学未来科学技術共同研究センター
シニアリサーチフェロー　福原幹夫
Email: mikio.fukuhara.b2@tohoku.ac.jp

（報道に関すること）
東北大学未来科学技術共同研究センター 広報
TEL: 022-795-4004
Email: niche-pr@grp.tohoku.ac.jp