

セルロースナノ粒子で

高性能電界効果型トランジスタを開発

— 再生可能な携帯用ペーパーエレクトロニクスへの利用に期待 —

【発表のポイント】

- 一年草のケナフ^(注1)から得られるアモルファス^(注2)セルロースのナノ粒子 (Amorphous Kenaf Cellulose Nano-Particle : AKCNP) を用いて、3.5 桁の増幅作用と、高いオン/オフ比^(注3)等の特性を示す金属半導体電界効果型トランジスタ^(注4) (MESFET) の作製に成功しました。
- AKCNP の伝導電子は複数の糖分子の共有結合であるグリコシド結合の酸素 (O) 原子誘起ラジカル^(注5)でした。
- 再生可能な天然化合物であるバイオ素材の携帯用ペーパーエレクトロニクス^(注6)への利用が期待されます。

【概要】

セルロースは地球上で一番生産量が多い(約 1,000 億トン/年)バイオマスであり、カーボンニュートラルとして地球温暖化・沸騰化の救世主となる素材として現在最も注目されている材料の一つです。

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橋田俊之特任教授、同大学大学院工学研究科小野崇人教授、静岡大学工学部藤間信久教授らの研究グループは共同で、AKCNP 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、負のゲート電圧で 3.5 桁の増幅作用と、正のゲート電圧において不揮発性メモリ効果^(注8)に対する 6173 という高いオン/オフ比が発現することを見出しました。また、伝導電子がセルロース分子中のグリコシド結合の酸素 O 原子の誘起ラジカルであることを、電子スピン共鳴法^(注9)の測定から明らかにしました。

研究グループは、セルロースの次に大量に存在する動物性バイオマスであるキトサン^(注10)のナノファイバーでも半導体特性を既に発見しており、低廉で自然界に広く存在するバイオ素材による半導体作製、さらにはペーパーエレクトロニクスへの展開が期待されます。

本研究結果は、2025 年 7 月 29 日に米国物理学協会 (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。また本論文は、注目度の高い論文として Editor's pick に選定されました。

【詳細な説明】

研究の背景

半導体は産業のコメと言われ、我々人間にとっ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 11)とガリウム・ヒ素 (GaAs) や π 共役ポリマー^(注 12)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・セルロースをナノサイズの微細構造体としたセルロースナノファイバー (CNF) を用いて、電荷分布や電子移動を計測し、TEMPO^(注 13) 酸化 CNF に高電圧短時間充電による高蓄電特性 (M. Fukuhara et al. Sci. Rep., **12**, 5619 (2022)) と一年草のケナフ源の CNF に電圧制御 (N) 型負性抵抗を示す n 型半導体の諸特性 (M. Fukuhara et al. Sic. Rep., **12**, 11899 (2022)) を見出しました。更に地球上 2 番目に多いバイオマス化合物である動物性キチン・キトサンにも、セルロースと同様の半導体特性と蓄電特性を見出してきました (M. Fukuhara et al. AIP Adv. 14, 035103 (2024))。このような電子的分野において、バイオマス素材が利用できると、廃棄物が低減され循環型社会構築に貢献できるとともに、地産地消に根差した新たな産業創出も大いに期待できます。

今回の取り組み

本研究では、植物素材の代表として直径を $\sim 11\text{nm}$ の AKCNP を用いて、ソースとドレインのアルミニウム (Al) 電極間に埋蔵させ金 (Au) のゲート電極で接触された三極 MESFET デバイスを作製しました(図 1)。図 2 はゲート電圧を負極にして 0V から -0.5V まで変調させ、ドレイン/ソース間の電圧を 0V から 1.5 V まで掃引したときの I_d (対数) - V_{ds} 出力曲線です。 I_d は対数表示で直線的に増加する線形領域の後、約 3.5 桁で飽和する飽和領域をもつ増幅曲線を描きました。ゲートバイアスが零の時にも伝導 n チャンネルが存在し、チャンネルコンダクタンスを減らすためゲートに負電圧を印加せねばならないため、このデバイスは n チャンネル「ノーマリーオン」MESFET と言われています。一方、n チャンネルを形成するために正の電圧を印加して n チャンネル「ノーマリーオフ」MESFET を作製しても図 2 と類似の飽和曲線が得られました。図 3 は正電極ドレインに対する I_{ds} - V_{gs} 伝搬特性であり、0-3 V 間の I_{ds} を対数で表記すると直線と放物線からなる 3 桁の増幅効果を示す特性が見られました。これはソースドレイン間を流れる電流がゲート電圧により制御される AKCNP 中の空乏層の大きさによって調整されることを示しています。従って、MESFET は電圧制御抵抗器と考えられる。一方、 $V_d=0\text{V}$ での V_{gs} が 0V $\sim$ 2V 間での I_{ds} とオン/オフ比を図 4 に示します。 $V_g=2\text{V}$ におけるその比 6173 はポリマー半導体の値と比べてかなり高く、不揮発性メモリ効果をもつスイッチング素子として期待

されます。

MESFET のオン/オフスイッチング速度($1/\tau$ ($=1/s$))はゲート長 ($L=10\text{mm}$)での伝搬時間 τ (s)、伝搬速度 V_d (cm/s) ($=L/\tau$) で求められます。 L を小さく、 V_d を大きくすればスイッチング速度は大きくなるので、微小電気機械システム (MEMS) として $L=1\mu\text{m}$ のデバイスを作った場合の V_d と τ の計算値を比較用として GaAs と Si の場合と対比させたものを表 1 に示します。AKCNP は GaAs の $1/1000$ 倍、Si と同等のスイッチング速度を持つことになります。

本研究で用いられましたセルロースの分子構造を図 5 に示します。第一原理計算^(注 14)の結果と伝導電子が図 5 のセルロース分子中のグリコシド結合の酸素 O 原子の誘起ラジカルであることを、電子スピン共鳴法の測定から明らかに致しました。

なお、本論文で見出したトランジスタ特性は、粒子状 CNP に加えて寸法並びにアスペクト比が比較的小さいファイバー CNF においても見出されました。

今後の展開

ポリマー半導体より 2 桁大きい電子移動度を用いて低密度軽量トランジスタ・蓄電体作製を通じて、天然由来のバイオ素材を活用することで地球の生物循環システムを活用したバイオエレクトロニクスを発展させることが期待されます。

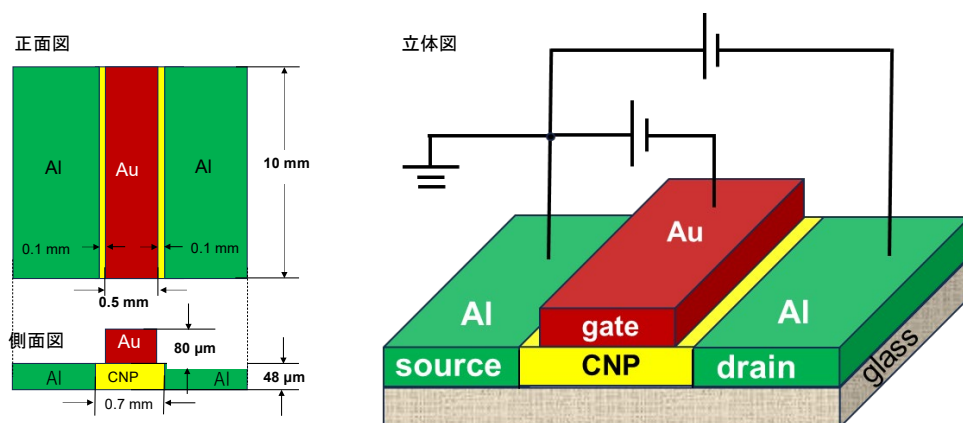


図 1. $\sim 11\text{nm}$ 径の CNP が Al のソース、ドレイン電極間に埋め込まれ Au のゲート電極と接合されたショットキー型 MESFET デバイスの正面図、側面図及び立体図

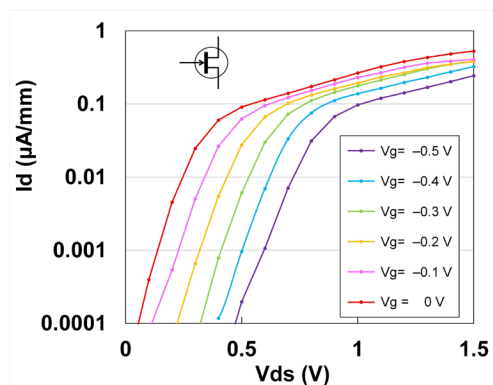


図 2. ゲートを 0V から -0.5V まで変調させ V_d を 0V から 1.5V まで掃引した時の電圧制御 I_d - V_{ds} 特性。3.5 桁の増幅作用が現れる。

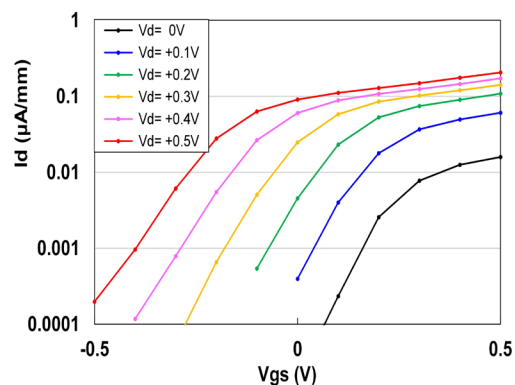


図 3. 正電極ドレインに対する I_{ds} - V_{gs} 伝搬特性

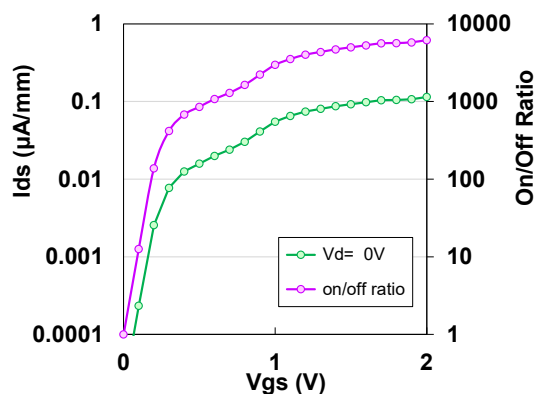


図 4. ドレイン電圧 $V_d=0$ における I_{ds} とオン/オフ比の V_{gs} 依存性

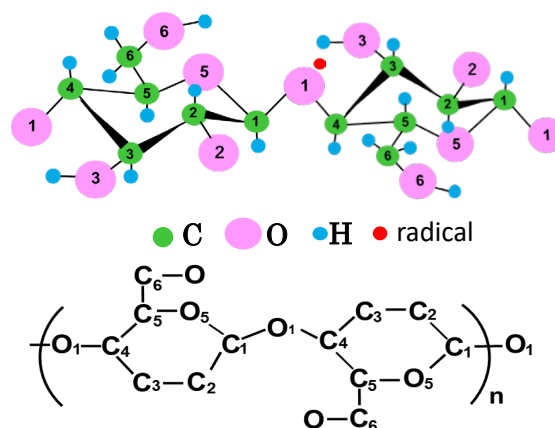


図 5. セルロース($C_6H_{10}O_5$) $_n$ の分子構造

表 1. $L=1\mu m$ までダウンサイジングした場合の AKCNP, GaAs, Si の諸特性値

材種	エネルギーギャップ (eV)	耐電圧 (V/cm)	電子移動度 (cm^2/Vs)	V_d (cm/s)	τ (s)
AKCNP	4.56	1.5 G	10.66	1.0×10^5	10 n
GaAs	1.43	300 k	5000	$\sim 2 \times 10^7$	10 p
Si	1.12	300 k	1500	$\sim 2 \times 10^7$	5 n

【用語説明】

注1. ケナフ：西アフリカを起源とするアオイ科フヨウ属の1年草の植物。繊維質が木と非常に似ているため紙の原料に使われ、アメリカの新聞紙の

約6割に使用されている。育てやすく、4カ月で4～5メートルに成長する。栄養価あり（カルシウム、鉄、ビタミン B2）、炭酸ガス吸収は木の3～9倍、汚泥中の窒素、リンを多量吸収する環境保全材である。

- 注2. 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です。結晶材料とは異なる種々の特性を示す。
- 注3. オン/オフ比：トランジスタなどの電子部品において、オン状態（電流が流れる状態）とオフ状態（電流が流れない状態）の電流値の比率のこと。この比率が大きいほど、スイッチング素子として優れているとされる。特に、ディスプレイデバイスにおいては、 10^6 乗以上のオン／オフ比が求められることが多い。
- 注4. 金属半導体電界効果型トランジスタ：（metal-semiconductor field effect transistor：MESFET）は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5. グリコシド結合の酸素（O）原子誘起ラジカル：セルロース β -1,4 結合グルコサミン基 O[●]中の対電子をもつ酸素 O 原子から励起された不対電子。
- 注6. ペーパーエレクトロニクス：セルロースやキトサンを基材として紙本来の特性を利用したエレクトロニクス。
- 注7. ショットキー接合：金属の仕事関数 Φ_m に比べ小さい仕事関数 Φ_n 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を指す。
- 注8. 不揮発性メモリ効果：電源を切ってもデータが保持されるメモリの特性を指す。従来の揮発性メモリ（DRAM など）は電源を切るとデータが消えてしまうが、不揮発性メモリは電源供給がなくてもデータを保存できる。
- 注9. 電子スピン共鳴法：ラジカル（不対電子）を持つ試料に磁場中でマイクロ波放射し、マイクロ波とラジカルの間で起こるマイクロ波を吸収して励起する原理を利用してラジカルの種類や量を測定する手法。ピークの中心位置で決定される g 値はラジカル固有の値をとり、 $g=2.0045$ の値より電子起源はグリコシド結合の酸素 O 原子の誘起ラジカルと判定されました。
- 注10. キトサン：カニやエビなどの甲殻類や昆虫の外殻に含まれるキチンから抽出される動物性食物繊維の一種。
- 注11. 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のこと。
- 注12. 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アー移動度が比重に小さく用途は限定的。

- 注13. TEMPO : 有機化合物 2,2,6,6-テトラメチルピペリジン-1-オキシルの略。
TEMPO は、室温環境でもラジカルとして十分に長い寿命を持つ試験研究用試薬で、アルコールの酸化反応の触媒として古くから知られている。
- 注14. 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。

【論文情報】

タイトル : Characteristics of Schottky gated field-effect transistors utilizing cellulose nanoparticles

著者 : Mikio Fukuhara, Tomonori Yokotsuka, Tetsuo Samoto, Takahito Ono, Nobuhisa Fujima & Toshiyuki Hashida

*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 **15**,075047(2025)

DOI : 10.1063/5.0279007

URL: <https://journals.aip.org>

【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