

News Release



平成 28 年 8 月 19 日

各報道機関文教担当記者 殿

省エネ社会に大きく貢献する究極のパワーデバイスの実現へ 世界初！反転層型ダイヤモンド MOSFET の動作実証に成功

金沢大学理工研究域電子情報学系の松本翼助教，徳田規夫准教授らの研究グループ(薄膜電子工学研究室)は，国立研究開発法人産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センターダイヤモンドデバイス研究チームの山崎聡招へい研究員，加藤宙光主任研究員，株式会社デンソーの小山和博担当課長らとの共同研究により，世界で初めてダイヤモンド半導体（※1）を用いた反転層チャネル MOSFET（※2）を作製し，その動作実証に成功しました。

省エネルギー・低炭素社会の実現のためのキーテクノロジーとして次世代パワーデバイスの開発が求められています。ダイヤモンドは，パワーデバイス材料の中で最も高い絶縁破壊電界とキャリア移動度，そして熱伝導率を有することから，究極のパワーデバイス材料として期待されています。しかし，高品質な酸化膜およびダイヤモンド半導体界面構造の形成が困難であるため，パワーデバイスにおいて重要なノーマリーオフ特性（※3）を有する反転層チャネルダイヤモンド MOSFET は実現していませんでした。

今回，研究グループは独自の手法で母体となる n 型ダイヤモンド半導体層および酸化膜とダイヤモンド半導体層界面の高品質化に成功しました。それらを用いた反転層チャネルダイヤモンド MOSFET を作製し，その動作実証に成功しました。

将来，ダイヤモンドパワーデバイスが自動車や新幹線，飛行機，ロボット，人工衛星，ロケット，送配電システムなどに導入されることで，ダイヤモンドパワーエレクトロニクスの道を切り開き，省エネ・低炭素社会への貢献が期待されます。

本研究成果は，平成 28 年 8 月 22 日発行の英国 Nature Publishing グループのオンライン雑誌「Scientific Reports」に掲載されるとともに，「ダイヤモンド半導体装置及びその製造方法」として特許も出願しております。なお，本研究の一部は，科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業(CREST)「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」(研究総括：安井 至)の研究課題「超低損失パワーデバイス実現のための基盤構築」および金沢大学が独自に行う戦略的研究推進プログラム(先魁プロジェクト)「革新的省エネルギーデバイスの創製」の一環として行われました。

本件配布先：金沢大学→石川県文教記者クラブ
産総研→筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、
中小企業庁ペンクラブ、資源記者クラブ
JST→文部科学記者会、科学記者会

【研究の背景】

エネルギー利用において持続可能な社会を実現するためには、再生可能エネルギーの利用とエネルギーの消費削減が要求されています。エネルギー消費に関して、現在は Si（シリコン）半導体を用いた反転層チャネル MOSFET や IGBT といったパワーデバイスが自動車や新幹線、飛行機、工業機器、医療機器など広く利用されています。しかし、Si 半導体はその物性値から性能限界が近づいています。そこで注目されているのが SiC（シリコンカーバイド）半導体、GaN（窒化ガリウム）半導体といったワイドバンドギャップ半導体です。ワイドバンドギャップ半導体は、熱伝導率や絶縁破壊電界などが Si 半導体よりも優れるため、大幅な省エネルギー化が可能な次世代パワーデバイス材料として期待されています。

ダイヤモンド半導体はそれらの次世代パワーデバイス材料よりも、さらに高い熱伝導率（Si の 14 倍）や絶縁破壊電界（Si の 100 倍）を有しているため、特に大きな電圧や電流が必要な領域での省エネルギー化につながると期待されています。

また、反転層チャネル MOSFET は、低消費電力化に必要な不可欠な電圧制御素子であり、OFF のときに電流が流れないノーマリーオフ特性を基本的に有しているため、信頼性が高く、Si 半導体で広く普及しています。しかし、ダイヤモンド半導体ではプロセスの難しさから反転層チャネル MOSFET の基本構造である良好な MOS 構造を形成することが困難であるという課題がありました。

【研究成果の概要】

本研究では、マイクロ波プラズマ化学気相成長法(※4)による n 型ダイヤモンド半導体の高品質化、ウェットアニール(※5)による酸化膜およびダイヤモンド界面の高品質化によって、反転層チャネルダイヤモンド MOSFET を作製し(図1参照)、その動作実証に世界で初めて成功しました。

作製した MOSFET の動作を調べると、ゲート電圧をかけていないときにはゲート電流もドレイン電流も検出限界以下(ノーマリーオフ特性)であり、ゲートにかける負電圧を大きくしていくと、MOS 界面の n 型ダイヤモンド半導体に空乏層が広がり、さらに負電圧を大きくすると少数キャリアである正孔がドレイン・ソース領域から流れ込むことで反転層チャネルが形成され(図1右下参照)、ドレイン電流が流れることを明らかとしました。その結果、ドレイン電流の理想的な飽和特性(図2参照)、高い on/off 比を確認しました。

【本研究成果で明らかにしたこと】

1. ダイヤモンド半導体を用いた反転層チャネル MOSFET を作製しました。
2. 同 MOSFET で、低消費電力のパワーデバイスに要求されるノーマリーオフ特性が実現されていることを実証しました。

本件配布先：金沢大学→石川県文教記者クラブ
産総研→筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、
中小企業庁ペンクラブ、資源記者クラブ
JST→文部科学記者会、科学記者会

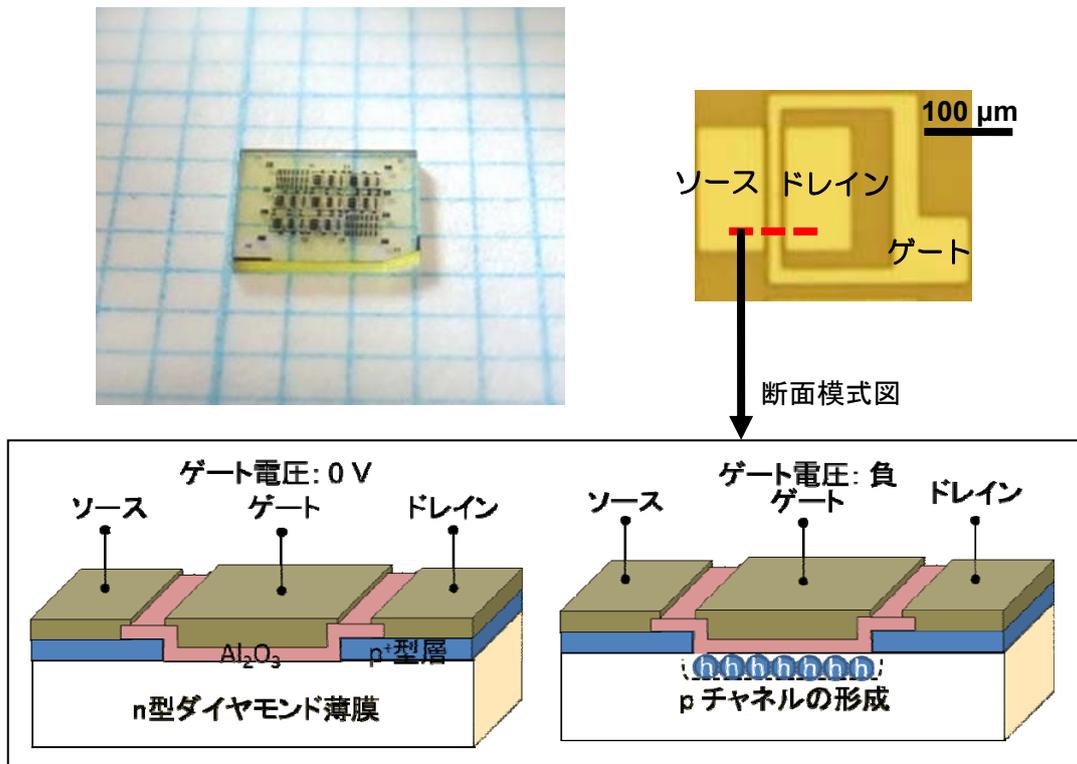


図 1. 今回作製した反転層チャネルダイヤモンド MOSFET (左上) とその中の一素子を光学顕微鏡で拡大した画像 (右上), 赤い破線部の断面模式図 (左下: ゲート電圧が 0 V 時, 右下: ゲート電圧が負の時)。

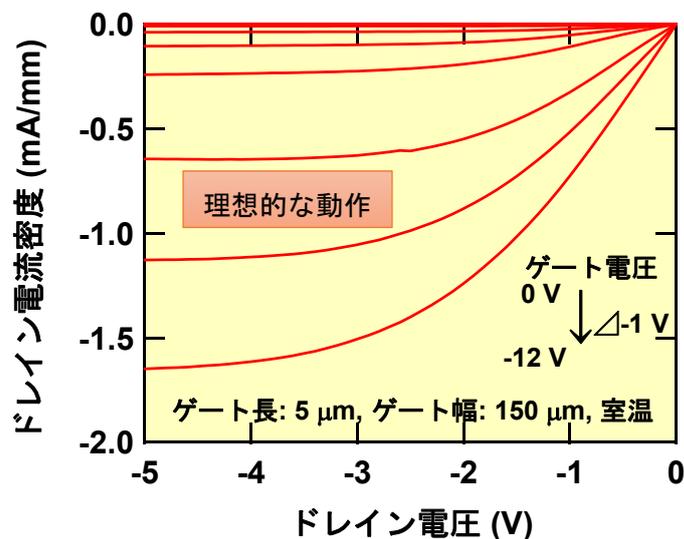


図 2. ゲート電圧を変化させたときのドレイン電圧に対するドレイン電流の変化
n 型ダイヤモンド半導体の MOS 界面にかける負のゲート電圧を増加させるとドレイン電流が増加していくため、少数キャリアである正孔がドレイン電流に寄与しており、反転層チャネルが形成されていることが分かる。

本件配布先：金沢大学→石川県文教記者クラブ
産総研→筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、
中小企業庁ペンクラブ、資源記者クラブ
JST→文部科学記者会、科学記者会

【研究成果の意義】

本成果によって、世界で初めて反転層チャネルダイヤモンド MOSFET の動作が実証されたことで、ダイヤモンドパワーエレクトロニクスの時代は大きく切り開かれると考えます。

将来的には、ダイヤモンド半導体を用いたパワーデバイスが自動車や新幹線、飛行機、ロボット、人工衛星、ロケット、送配電システムなどに導入されることで、省エネ・低炭素社会への貢献が期待されます。

今後は、応用に必要な大電流化と高耐圧化を図るために、MOS 界面のさらなる高品質化による移動度の向上、ドレイン領域に耐圧層の導入が必要ですが、近い将来、日本発のダイヤモンドパワーエレクトロニクス産業の創出にも貢献します。

【用語解説】

※1 ダイヤモンド半導体:

ダイヤモンド半導体は炭素のみからなる半導体であり、Si 半導体と同じ単元素半導体に属する。SiC 半導体や GaN 半導体などの化合物半導体と比べ、単元素半導体は Si 半導体のように不純物や格子欠陥を排除しやすいため、ダイヤモンド半導体も Si 半導体同様に究極の高品質化が期待される。

※2 反転層チャネル MOSFET:

MOSFET は Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor の略称で、金属と酸化膜、半導体からなる界面を有する電界効果トランジスタのことである。この MOSFET のゲートに、母体である半導体と同じ極性のゲート電圧をかけると、MOS 界面に少数キャリアが蓄積し、母体と反転した極性のチャネル（低抵抗層）が形成される。このチャネルを反転層チャネルと呼ぶ。

現在普及しているトランジスタの多くが反転層チャネル MOSFET である。これは、反転層チャネル MOSFET が基本的にノーマリーオフ特性を有しており、高い信頼性を有しているためである。

※3 ノーマリーオフ特性:

システムとしては動作中であっても、真に動作すべき構成要素以外の電源を積極的に遮断することで、誤動作を防ぎ、消費電力を最小限に抑える特性のことである。

ノーマリーオフ特性は、パワーデバイスにおいて最も重要で最低限必要とされる特性である。パワーデバイスは自動車や新幹線、飛行機といった大電力を利用した輸送機器に広く用いられている。このため、安全性は最も重視され、壊れたときに出力が 0 となるノーマリーオフ特性はパワーデバイスにとって最低限必要な特性とされている。また、待機消費電力の観点からも、OFF 状態でリーク電流がほとんどないノーマリーオフ特性が有効である。

本件配布先：金沢大学→石川県文教記者クラブ
産総研→筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、
中小企業庁ペンクラブ、資源記者クラブ
JST→文部科学記者会、科学記者会

※4 マイクロ波プラズマ化学気相成長法:

ダイヤモンドを成長させる手法の一つで、プラズマ中でメタンや水素を活性化させ、高品質なダイヤモンド層を堆積させることが可能である。

※5 ウェットアニール:

不活性ガスを純水中に通気（バブリング）させ、不活性ガスで希釈された高温の水蒸気雰囲気で行う熱処理のことである。ダイヤモンド半導体の表面を酸素と水素からなる OH 基で終端させるために行う。

【掲載誌】

雑誌名：Scientific Reports

論文名：Inversion channel diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistor with normally off characteristics

(ノーマリーオフ特性を有する反転層チャンネルダイヤモンド MOSFET の開発)

著者名：Tsubasa Matsumoto, Hiromitsu Kato, Kazuhiro Oyama, Toshiharu Makino, Masahiko Ogura, Daisuke Takeuchi, Takao Inokuma, Norio Tokuda, and Satoshi Yamasaki (松本翼, 加藤宙光, 小山和博, 牧野俊晴, 小倉政彦, 竹内大輔, 猪熊孝夫, 徳田規夫, 山崎聡)

掲載日時：英国夏時間：平成 28 年 8 月 22 日午前 10 時(日本時間：平成 28 年 8 月 22 日午後 6 時)にオンライン版に掲載

【本件に関するお問い合わせ先】

<研究に関すること>

金沢大学理工研究域電子情報学系助教／リサーチプロフェッサー (※)

松本 翼 (まつもと つばさ)

TEL：076-234-4890

E-mail：t-matsumoto@se.kanazawa-u.ac.jp

金沢大学理工研究域電子情報学系准教授／リサーチプロフェッサー (※)

徳田 規夫 (とくだ のりお)

TEL：076-234-4875

E-mail：tokuda@se.kanazawa-u.ac.jp

※金沢大学独自の制度であり、研究に専念するために管理業務の軽減など特別の措置を適用される教員のこと

<JST事業に関すること>

鈴木 ソフィア沙織 (スズキ ソフィアサオリ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

Tel：03-3512-3531 Fax：03-3222-2066

E-mail：crest@jst.go.jp

本件配布先：金沢大学→石川県文教記者クラブ 産総研→筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、 中小企業庁ペンクラブ、資源記者クラブ JST→文部科学記者会、科学記者会

<広報担当>

金沢大学総務部広報室広報係 寺口 浩史(てらぐち ひろふみ)

TEL : 076-264-5024

E-mail : koho@adm.kanazawa-u.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-mail : jstkoho@jst.go.jp

本件配布先：金沢大学→石川県文教記者クラブ
産総研→筑波研究学園都市記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、
中小企業庁ペンクラブ、資源記者クラブ
JST→文部科学記者会、科学記者会