



平成 29 年 1 月 26 日

科学技術振興機構 (JST)
Tel : 03-5214-8404 (広報課)

東京工業大学
Tel : 03-5734-2975 (広報センター)

産業技術総合研究所
Tel : 029-862-6216 (報道室)

パワーデバイス内部の電界を正確に計測することに成功 ～さらなる省エネ化に期待～

ポイント

- 窒素-空孔センターの電子スピンレベルの変化を使った新たな電界センサーを開発し、デバイス内部の電界を直接観察することに成功した。
- 原子レベルセンサーをデバイス内部に形成することで、デバイス性能を損なわず、定量的かつ高空間分解能計測を実現した。
- ワイドバンドギャップ半導体による省エネルギーパワーデバイス開発の促進が期待できる。

JST 戦略的創造研究推進事業の一環として、東京工業大学の岩崎 孝之 助教と波多野 睦子 教授、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 牧野俊晴 研究チーム長らのグループは、ダイヤモンドパワーデバイス^{注1)}内部に原子レベルの構造である窒素-空孔 (NV) センター^{注2)}を形成し、高電圧動作中のパワーデバイス内部の電界強度を定量的にナノメートルスケールで計測することに世界で初めて成功しました。

低炭素社会への貢献が大きいパワーデバイスは、従来の Si (シリコン) 半導体から、SiC (炭化ケイ素)、GaN (窒素ガリウム)、ダイヤモンドなどのワイドバンドギャップ半導体^{注3)}を使った次世代パワーデバイスへ置き換えることで、さらに大幅な省エネ化、機器の小型化が実現できます。パワーデバイスは大きな電圧を保持することが重要な性能となりますが、これまでに電圧をかけたときのデバイス内部の電界を定量的に計測することができませんでした。

研究グループは、原子サイズの NV センターの電子スピン^{注4)}レベルを電界で変化させる新たな電界センサーを提案し、パワーデバイスの内部に形成させた状態で光を検出することにより、デバイス内部の電界を定量的にその場で計測できることを実証しました。デバイスシミュレーションが困難な状況への適用も期待でき、パワーデバイスの動作計測を通して、次世代低損失パワーエレクトロニクス実現への貢献が期待できます。

本研究成果は、2017年1月23日 (米国東部時間) に米国化学会の学術誌「ACS Nano」でオンライン公開されました。

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

戦略的創造研究推進事業 チーム型研究 (CREST)

研究領域 : 「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」
(研究総括 : 桜井 貴康 東京大学 生産技術研究所 教授)

研究課題名 : 「炭素系ナノエレクトロニクスに基づく革新的な生体磁気計測システムの創出」

研究代表者 : 波多野 睦子 (東京工業大学 工学院電気電子系 教授)

研究期間 : 平成 25 年 10 月 ~ 平成 31 年 3 月

＜研究の背景と経緯＞

ダイヤモンド半導体は電力損失の少ない次世代低損失パワーエレクトロニクスを構築する高性能デバイス材料です。ダイヤモンドデバイスの実現により、自動車、鉄道、自然エネルギーによる発電とその送電、スマートグリッドの電力制御など大電力変換時の大幅な省エネルギー化が期待されています。新しい材料によるパワーデバイスの早期実用化に向けて、各デバイス内部の情報を検出し、デバイスの製造にフィードバックを行い、より効率的に開発を進めることが重要となります。

半導体デバイス内部の電界は、デバイス性能を決める重要な要素です。電界強度が材料を破壊する限界の電圧を超えると、システムは正常かつ安全に動作することができなくなります。予期せぬ動作や性能の詳細な解析には、パワーデバイスの内部電界を直接観察する技術が必要になります。現在、電気特性評価として走査型プローブ顕微鏡^{注5)}による方法がありますが、この場合は材料表面のみの計測となってしまう、定量的かつナノメートルスケールの空間分解能で内部電界を計測することは困難でした。

この問題を解決するために、研究グループはダイヤモンド半導体中の窒素－空孔（NV）センターを利用し、直接デバイス内部の電界を計測する手法を開発しました。NVセンターはダイヤモンド格子中に1つの窒素原子と1つの空孔からなる原子レベルの構造であるため、ナノメートルスケールで電界、磁場、温度などの外部環境変化を計測することができます（図1）。NVセンターはダイヤモンドの大きなバンドギャップ中にエネルギーレベルを形成するため、熱的に安定であり、室温や大気中でも高感度センサーとして機能します。

＜研究の内容＞

本研究では、NVセンターをダイヤモンドパワーデバイス内に作りこむことによって、デバイス内部にかかる高電界を定量的に直接計測することに世界で初めて成功しました。図1は、NVセンターを含むダイヤモンドp i nダイオードの構造と電界計測のための検出系です。ダイヤモンドデバイスに窒素イオンを注入することで、NVセンター一つ一つを分離できる量のセンサーを表面から約350nmの深さに形成しています。空間分解能は光の回折限界である約300nmであるため、ナノメートルスケールの内部計測が可能となります。

パワーデバイスはスイッチがオフのときに大きな電圧を保持し、高い内部電界を発生します。そこで、p i nダイオードの逆方向バイアス印加時（図2（a））における電界計測を行いました。また、NVセンターを導入してもデバイスは低いリーク電流を保っており、ダイオードとして動作していることを確認しました。

計測は光検出磁気共鳴法（ODMR）^{注6)}で行いました。緑色のレーザーで励起したときにNVセンターが出す赤色蛍光を観測することで、NVセンターが感じる電界を検出する方法で、NVセンターのスピンレベル間に対応するマイクロ波周波数位置で赤色強度が減少することを利用します。電界との相互作用により、このエネルギー位置が変化するため、ODMRでの共鳴点がシフトして、このシフト量から電界を定量的に求めることができます。図2（b）は逆方向にバイアスを上昇させたときのODMRスペクトルです。電圧が

高くなるにつれ、発光強度の谷（共鳴点）が変化していく様子が確認できます。これは、NVセンターのN-V軸に垂直な電界 E_{\perp} を検出していることに対応します。共鳴点の位置から電界を算出した結果が図2（c）です。電圧の上昇に伴い電界も増加し、150Vで約350kV/cmになります。これはNVセンターで検出した電界で最も大きな値です。実験で得られた電界強度はデバイスシミュレーターの結果と一致しており、定量的にパワーデバイスの内部電界をナノメートルスケール計測できることを確認しました。

<今後の展開>

本研究により、パワーデバイスの内部電界が定量的かつナノメートルスケールで計測できることを実証しました。この手法は、予期しない電界集中発生や大きなリーク電流下、絶縁破壊電圧印加時での電界測定など、正確なシミュレーションが困難な状況への適用も期待できます。また、複数のNVセンターを利用することで、電界強度をイメージングすることも可能になります。さらに超解像顕微鏡^{注7)}と組み合わせることで空間分解能を10nm程度まで向上させられることや、パワーデバイスの動作解析を通して材料開発へのフィードバックが加速することで、次世代低損失パワーエレクトロニクス実現への貢献が期待できます。

また、ダイヤモンド中のNVセンター以外にも、SiC（炭化ケイ素）、GaN（窒素ガリウム）、AlN（窒化アルミニウム）、h-BN（六方晶窒化ホウ素）などさまざまなワイドバンドギャップ材料中に原子レベルの発光構造（SiC中のSi空孔など）があることが確認されています。発光構造の形成方法およびスピン制御技術の開発により、これらの材料に対しても、今回開発した計測手法が適用可能であると期待できます。

<付記>

本成果の一部は、公益財団法人 東電記念財団 研究助成（基礎研究）の支援から得られました。

<参考図>

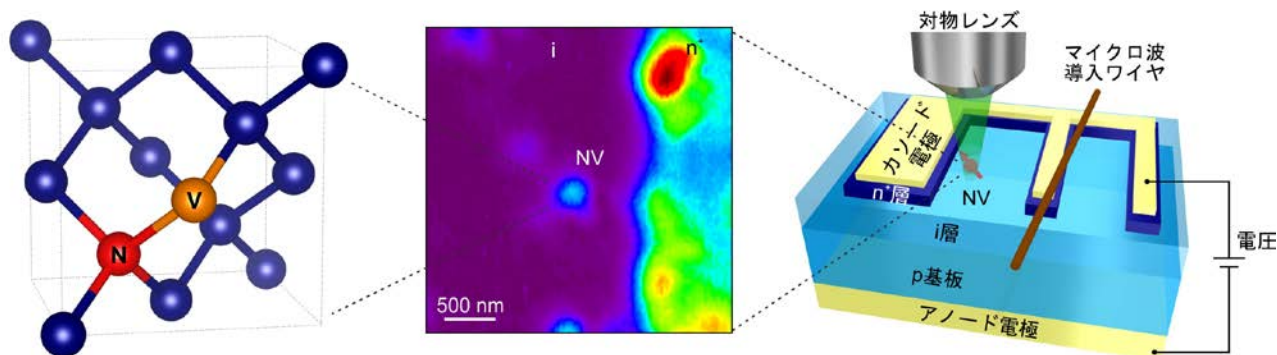


図1 NVセンターによるダイヤモンドパワーデバイスの内部電界検出

(左 図) NVセンターの構造図

(中央図) NVセンターの共焦点顕微鏡像

(右 図) 計測系およびデバイス構造

NVセンターとは、ダイヤモンド中の隣り合った炭素原子が窒素（N）と空孔（V）に置き換わったもので、高感度な磁気センサーや電界センサー、温度センサーなど幅広い応用が期待されている。中央図で、共焦点顕微鏡像中に見える明るい点が、デバイス中に作りこんだNVセンターからの発光。この発光の強さをマイクロ波および逆方向にバイアスをかけながら測定することで、デバイス内部の電界を検出することができる。

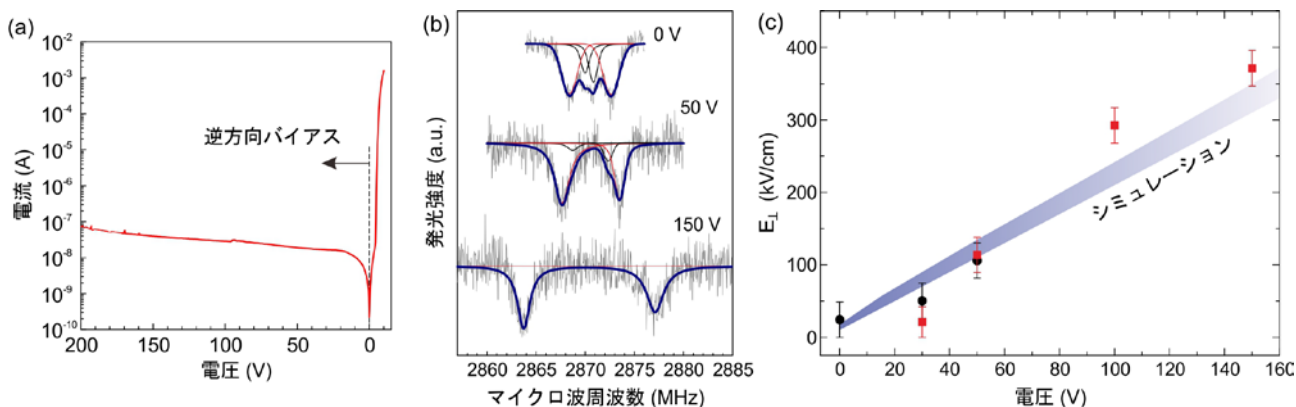


図2 光検出磁気共鳴法（ODMR）による電界計測

(a) ダイヤモンドp i nダイオードの電流電圧特性

(b) 逆方向バイアス印加時のODMRスペクトル

(c) 検出電界と電圧の関係

大きな電圧を印加することで発光強度が減少する発光強度の谷（共鳴点）の位置がシフトしていく様子が見られる。発光強度の谷同士の幅から電界を算出したものが右図。デバイスシミュレーションと一致していることから、この手法によりデバイスの内部電界を定量的に計測できていることがわかる。

<用語解説>

注1) パワーデバイス (電力用半導体素子)

家電から自動車、鉄道、送電などインフラにおいて電圧、電流、周波数を制御し、省エネルギー電力変換を担う半導体デバイス。さらなる省エネルギー化のために、大電流容量、高耐電圧および高放熱をかね備えたデバイスが望まれていて、ダイヤモンドは、このパワーデバイスとしての応用が期待されている。

注2) 窒素 - 空孔 (Nitrogen-Vacancy: NV) センター

ダイヤモンド結晶中の複合欠陥の一種であり、不純物原子である窒素 (Nitrogen) と空孔 (Vacancy) が隣り合うことで形成される原子レベルの構造体。分裂した電子スピン準位を持ち、その利用により高感度な計測が可能となる。

注3) ワイドバンドギャップ半導体

バンドギャップが大きい半導体材料であり、次世代低損失パワーデバイスに重要な高絶縁破壊電界強度を持っている。主に使用されているSiのバンドギャップが1.1 eVであるのに対し、SiC (炭化ケイ素)、GaN (窒素ガリウム)、ダイヤモンド半導体などのバンドギャップは数倍大きく (ダイヤモンド5.5 eV)、物性限界のためにSiデバイスでは達成できない低損失デバイスの実現が期待されている。

注4) 電子スピン

電子が持つ角運動量の1つ。NVセンターは基底状態で固有状態0、-1、+1を持ち、 $0 \rightarrow -1$ および $0 \rightarrow +1$ の共鳴を調べることで電界、磁場、温度などの情報を計測することができる。

注5) 走査型プローブ顕微鏡

非常に鋭い先端を持ち、探針を試料表面に近づけることにより計測する顕微鏡の総称。表面形状をトレースすることで構造、電気的および磁氣的性質を観察することができる。その一種であるケルビンプローブフォース顕微鏡により、試料表面の電位を計測することができる。

注6) 光検出磁気共鳴法 (Optically Detected Magnetic Resonance: ODMR)

光学的に電子スピン共鳴 (Electron Paramagnetic Resonance) を検出する手法。EPRは電子スピン準位間をマイクロ波で共鳴させることにより不対電子を検出する手法であり、試料からの光を検出するのがODMRである。

注7) 超解像顕微鏡

光学顕微鏡の空間分解能は光の回折限界により制限されるが、その空間分解能を超える

性能を持つ顕微鏡。2014年のノーベル化学賞は超解像顕微鏡の開発に授与されている。

<論文タイトル>

“Direct Nanoscale Sensing of the Internal Electric Field in Operating Semiconductor Devices Using Single Electron Spins”

(単一電子スピンを用いた半導体デバイス内部電界の直接的ナノスケールセンシング)

doi:10.1021/acsnano.6b04460.

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

波多野 睦子 (ハタノ ムツコ)

東京工業大学 工学院電気電子系 教授

〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1-NE18

Tel : 03-5734-3999 Fax : 03-5734-3999

E-mail : hatano.m.ab@m.titech.ac.jp

<JSTの事業に関すること>

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

<報道担当>

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 : jstkocho@jst.go.jp

東京工業大学 広報センター

〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1

Tel : 03-5734-2975 Fax : 03-5734-3661

E-mail : media@jim.titech.ac.jp

産業技術総合研究所 企画本部 報道室

〒305-8560 茨城県つくば市梅園1-1-1

中央第1 つくば本部・情報技術共同研究棟

Tel : 029-862-6216 Fax : 029-862-6212

E-mail : press-ml@aist.go.jp