



Tokyo Tech



2021年6月26日

報道機関各位

東京工業大学
産業技術総合研究所

小型・集積化につながるダイヤモンド量子センサの スピン情報の電氣的読み出しに成功

—量子センサの社会実装を加速する成果—

【要点】

- 量子センサである窒素—空孔 (NV) センタの信号をダイオード構造を用いて電氣的に検出
- 光電検出磁気共鳴 (PDMR) により、量子センサのスピン情報の電氣的検出を実証
- 集積固体量子センサへの応用に期待

【概要】

東京工業大学 工学院 電気電子系の岩崎孝之准教授と波多野睦子教授、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 新機能デバイスチームの加藤宙光主任研究員、牧野俊晴研究チーム長らの共同研究グループは、**量子センサ** (用語 1) として機能するダイヤモンド中の**窒素—空孔 (NV) センタ** (用語 2) のスピン情報を、ダイヤモンドデバイスを用いて電氣的に検出することに成功した。

新たに開発した**ダイヤモンド p-i-n ダイオード** (用語 3) に内包した NV センタの光電流を、電圧ゼロの状態でも**内蔵電位** (用語 4) により効率良く取り出せることを実証した。**光電検出磁気共鳴 (PDMR)**、用語 5) 測定から、センシングの原理となるスピン情報検出を示した。量子センサの集積化の設計に重要となる光キャリアの**拡散長** (用語 6) を測定した。今後、デバイスによるキャリア増倍技術と組み合わせることで、高感度な集積量子センサの実現が期待できる。

研究成果は 2021 年 6 月 25 日 (米国東部時間)、AIP Publishing の「*Applied Physics Letters*」に掲載される。

●研究の背景

ダイヤモンド中の窒素-空孔 (NV) センタは、**生体磁場** (用語 7) など微弱な磁場を検出可能な量子センサとして機能する。通常は NV センタが発する蛍光を光検出器により計測するが、光学素子による信号の減衰や、素子数の増加による大型化により性能改善と集積化を両立させることが困難となる問題があった。

この光学的検出に対して、従来は金属-ダイヤモンド (絶縁体) -金属の MIM 構造を用いた電氣的検出が取り組まれていたが、より高感度で小型なセンサシステム構築に発展可能なデバイス構造による電氣的検出が求められていた。

●研究成果

本研究では、横型のダイヤモンド p-i-n ダイオード構造を利用した NV センタの電氣的検出技術を実証した。今回開発したダイヤモンド p-i-n ダイオードは、i 層の上に化学気相合成法を用いて高濃度に不純物をドーピングした p 層および n 層をパターン形成した構造を有する (図 1 左)。NV センタは窒素イオン注入によって、i 層中に形成した。

レーザによる光励起によって p 層近傍の NV センタから発生した光キャリアは、外部電圧を印加しない状態においても計測できることがわかった (図 1 中央)。これは、ドーピングが異なるダイヤモンドの接合部に発生する内蔵電位によって、効率的に光キャリアを収集できていることを示している。0 から 10 mW の光を照射した場合に、照射光のパワーに応じた光電流が得られた。マイクロ波を印加しながら NV センタからのスピン情報を電氣的に検出する PDMMR 測定に成功し、量子センサとして機能することを実証した (図 1 右)。

従来は NV センタから生成された光キャリアがどの程度の距離を移動できるか明らかになっていなかった。本研究では、光照射の位置を変えて、電氣的信号の距離依存性を測定することで、NV センタから発生する光キャリアの拡散長の測定を世界で初めて行った。この知見は固体量子センサの集積化の設計において重要となるものである。

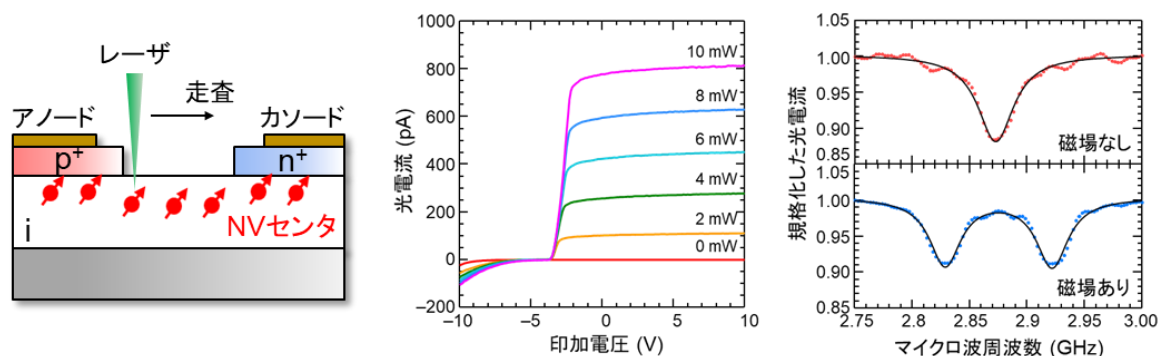


図 1. (左) NV センタを内包する横型ダイヤモンド p-i-n ダイオード。レーザを走査しながら電氣的信号を検出することで拡散長を評価した。

(中央) 電氣的に検出した NV センタからの光電流。正の電圧はダイオードに対して逆バイアスを表している。レーザパワーを 0-10 mW まで変えたときの結果。

(右) PDMR スペクトル。信号の谷がスピン状態の共鳴点であり、外部磁場による分裂は磁場センサとして機能することを示している。

●今後の展開

本研究は、ダイヤモンドデバイス技術に基づく量子センサの効率的な電氣的検出および集積化に道を開くものであり、今後、ダイオードの**アバランシェ増倍**(用語 8) によって NV センタからの信号強度を数桁向上させられる可能性も有しているため、高感度固体量子センサの発展に貢献するものと期待できる。

【付記】

本研究は、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププロジェクト (Q-LEAP) 「固体量子センサの高度制御による革新的センサシステムの創出」(No. JPMXS0118067395) および日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (B) (No. 18H01472) の支援を受けて行われた。

【用語説明】

- (1) **量子センサ**：量子力学に基づく物理を利用したセンサ。ダイヤモンド量子センサは、NV センタのスピン状態の操作および読み出しを行うことでセンサとして働く。
- (2) **窒素-空孔 (NV) センタ**：炭素原子からなるダイヤモンド結晶において、炭素 1 個が窒素に置き換わり、その窒素に空孔 1 個が隣接している構造。
- (3) **ダイヤモンド p-i-n ダイオード**：ダイヤモンド半導体から作られたダイオード。p 層にはアクセプタとしてホウ素をドーピングし、n 層にはドナーとしてリンをドーピングしている。2 つの層に挟まれた i 層は不純物濃度が低い半導体層である。
- (4) **内蔵電位**：ドーピングが異なる半導体を接合したときに発生する電位差。
- (5) **光電検出磁気共鳴 (PDMR)**：NV センタのスピン状態を、光励起・マイクロ波照射および電氣的検出を用いて読み出す技術。
- (6) **拡散長**：NV センタから発生した光キャリアが再結合されるまでに移動できる距離。
- (7) **生体磁場**：心臓や脳の活動によって発生する磁場。
- (8) **アバランシェ増倍**：電界によって加速された半導体中のキャリアが衝突によって新たなキャリアを発生させ、その繰り返しによってキャリア数が増幅する現象。

【論文情報】

掲載誌：*Applied Physics Letters*

論文タイトル：Photoelectrical detection of nitrogen-vacancy centers by utilizing diamond lateral p-i-n diodes

著者：T. Murooka, M. Shiigai, Y. Hironaka, T. Tsuji, B. Yang, T. M. Hoang, K. Suda, K. Mizuno, H. Kato, T. Makino, M. Ogura, S. Yamasaki, M. Hatano, and T. Iwasaki

DOI：10.1063/5.0055852

【問い合わせ先】

東京工業大学 工学院 電気電子系 准教授
岩崎孝之

Email: iwasaki.t.aj@m.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2169

FAX: 03-5734-2169

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 新機能デバイス
チーム 主任研究員

加藤宙光

Email: hiromitsu.kato@aist.go.jp

TEL: 029-861-3461

FAX: 029-861-2773

【取材申し込み先】

東京工業大学 総務部 広報課

Email: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975

FAX: 03-5734-3661

産業技術総合研究所 広報部 報道室

Email: hodo-ml@aist.go.jp

TEL: 029-862-6216

FAX: 029-862-6212