

一般論文

関連するSDGs

ダイヤモンドNVセンターを用いた
可搬型センサーモジュールによる
パルス量子操作Pulsed Quantum Manipulation by a Portable Sensor
Module Using the Diamond NV Center辰 巳 夏 生
Tatsumi Natsuo林 司
Hayashi Tsukasa中 尻 佳 秀
Nakajiri Yoshihide森 下 弘 樹
Morishita Hiroki出 口 洋 成
Deguchi Hiroshige済 藤 紘 矢
Saito Hiroya藤 原 正 規
Fujiwara Masanori水 落 憲 和
Mizuochi Norikazu

概要

ダイヤモンドの結晶中に窒素 (Nitrogen) と空孔 (Vacancy) がペアをつくった構造であるNVセンターは、磁気センサーへの応用だけでなく、量子暗号通信や量子コンピュータなどさまざまな量子技術への応用が期待されている。今回、このダイヤモンドNVセンターを用いて、量子操作を可能にする可搬型かつ低消費電力のパルス量子センサーモジュールを開発した。本稿ではパルス法を用いた本モジュールによるRabi振動、光検出磁気共鳴、Ramsey法、Hahn-Echo法などの量子操作について解説し、従来の連続波 (CW) 法よりも高い計測感度が得られることを紹介する。

Synopsis

The diamond nitrogen-vacancy (NV) center is expected to be applied not only to magnetic sensors, but also to various quantum technologies such as quantum cryptography and quantum computing. Using the diamond NV center, we have developed a portable and low-power pulsed quantum sensor module that enables quantum operations. Various quantum operations by the pulsed method are described, including Rabi oscillation, pulsed-ODMR (optically detected magnetic resonance), and Ramsey and Hahn-echo. Pulse measurement achieved greater sensitivity than conventional continuous wave measurement.

キーワード：ダイヤモンド、窒素空孔欠陥、NV、量子、センサー

1. はじめに

ダイヤモンドは、物質中最高の硬さを持つとされ、その優れた機械的、物理的、および化学的物性や宝石としての比類の無い美しさから常に着目されてきたが、近年ではその優れた量子物性にも注目が集まっている。ダイヤモンドの結晶中で不純物と空孔 (Vacancy) がペアを作るとカラーセンターが生じる。この光学的特性の中でも、特に窒素 (Nitrogen) と空孔のペアであるNVセンター (図1 (a) (b)) が精力的に研究されている。

このダイヤモンドNVセンターは、シリコン半導体や超伝導物質などと異なり、室温でもスピンという磁気物性を長時間維持することが知られており、高感度な磁気センサーとして、心磁・脳磁センサー⁽¹⁾、バイオセンサー^{(2) (3)}、車載バッテリーセンサー⁽⁴⁾ などさまざまな用途への応用が期待されている。さらに、このスピンという特性を利用して量子もつれの生成や量子操作が可能であることが実証されていることから、室温で動作可能な量子コンピュータ⁽⁵⁾ や量子暗号通信⁽⁶⁾ にダイヤモンドNVセンターを応用することも期待されている。

日新電機研究開発本部では、このようなダイヤモンドNVセンターに着目し、量子操作を可能にする可搬型パルス量子センサーモジュールを開発した(図1(c))。2024年4月には、送配電機器・エネルギーソリューション事業を強化すべく、住友電気工業株式会社と融合した「日新住電エネルギーシステム開発センター」を新たに開設し、住友電気工業の「環境・エネルギー技術、素材技術」と日新電機の「電力技術、システム化技術」のシナジーによる開発の加速と社会実装を目指している。本稿ではそれらに資するセンサー技術の一つとして、ダイヤモンドNVセンターの性能とその可能性について報告する。

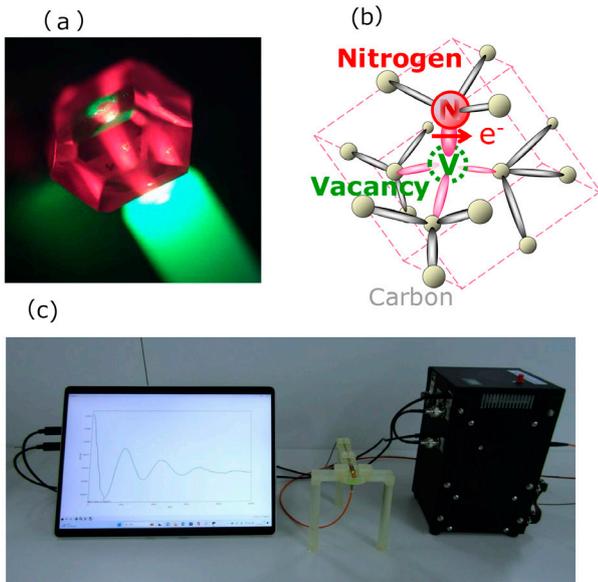


図1 ダイヤモンドNVセンターの構造とモジュールの外観 (a) 光ファイバー先端に取り付けたダイヤモンドNVセンター、(b) NVセンターの結晶構造、(c) 可搬型パルス量子センサーモジュール

2. ダイヤモンドNVセンターを用いた可搬型量子センサーモジュール

ダイヤモンドNVセンターの基底状態はスピン三重項となっており、 $m_s = \pm 1$ の準位は磁界によりゼーマン分裂(外部磁場によって原子のエネルギー準位が分裂する現象)することが知られている(図2)。これらの準位にある電子は、通常、緑色の光を当てて励起すると赤色に発光しながら基底状態に戻る。ところが、 $m_s = 0$ と ± 1 のエネルギー差に一致したマイクロ波を照射すると、励起光を当てても発光することなく基底状態に戻る。このように、マイクロ波の共鳴周波数と発光の有無を観察することによって、ダイヤモンドNVセンターにかかる磁場の強度をセンシングすることが可能となる。このような特性は光検出磁気共鳴(Optically Detected Magnetic Resonance: ODMR)と呼ばれている。これに着目し、独自の光学系とマ

イクロ波共鳴器を用いてマイクロ波を連続的に照射(Continuous Wave: CW)する可搬型のダイヤモンドNVモジュールの開発を進めてきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

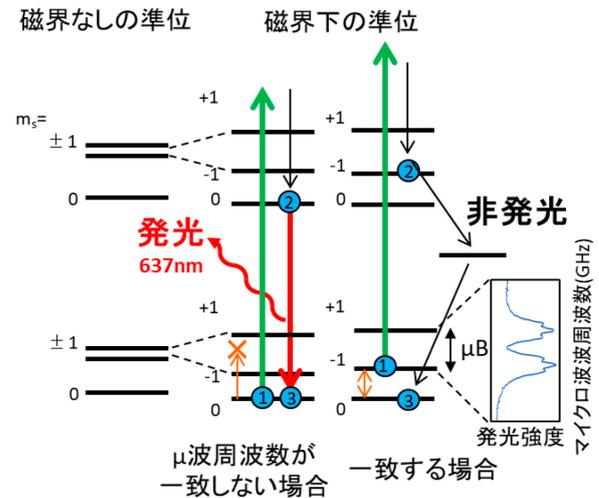


図2 NVセンターの電子状態

これまで、多くの企業や研究機関において、可搬型モジュールにはCWモードが使用されてきたが⁽⁴⁾⁽⁹⁾、ダイヤモンドNVセンターの電子スピンをより高精度に操作し、より高感度なセンサーを開発するには、大掛かりな光学系やマイクロ波制御機能を備えた光学台での実験が必要であった⁽¹⁰⁾。今回は、パルスパターンジェネレータ、位相シフタ、マイクロ波スイッチなどのパルス操作の機能を付加しながら大幅に駆動回路を小型化することに成功し、可搬型、かつUSB3.0電源を使用し、4Wの低消費電力にて動作するパルス量子センサーモジュールの開発に成功した⁽¹¹⁾。次に、量子操作の原理と、本モジュールによるRabi振動測定、パルスモードでのODMR法(Pulsed-ODMR法)、Ramsey法、Hahn-Echo法などの量子操作について3章以降で詳細に説明する。

3. 量子操作の原理とパルスモジュールの動作

(1) 電子スピンの位相空間

ダイヤモンドNVセンターの量子操作について、主に $m_s = 0$ と1の間の操作について説明する。電子スピンの状態をz軸で表し、位相を θ とすると、電子の存在確率 $|\psi\rangle$ は

$$|\psi\rangle = \cos(\theta/2)|0\rangle + \sin(\theta/2)|1\rangle$$

と表現できるため、視覚的には半径1の円で図示するのが基本的な考え方である(図3(a))。ただし、2次元的な表現では共鳴状態からのズレやコヒーレンス(量子的な波の性質)の消失まで表現することができないため、これらの表現には、位相を表すy軸に直交する方向にマイクロ波共鳴周波数に対応するx軸を加えたブロッホ(ドイツ人名)球を用いる(図3(b))。

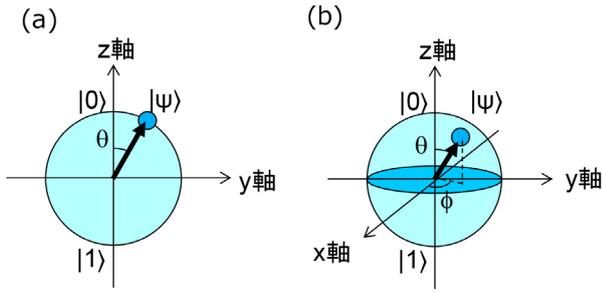


図3 NVセンターの電子スピンの位相状態
(a) 理想的な2準位の位相状態の表現、(b) 実際の共鳴状態のズレ等を加味したブロッホ球による位相状態の表現

(2) Rabi振動測定

正確な量子操作を行うにはまずRabi振動を測定する。 $m_s=0$ と 1 の間のエネルギーに応じた共鳴周波数のマイクロ波を照射すると、ダイヤモンドNVセンターの電子スピンは回転を始めて $m_s=0$ と 1 の間を行きかい、この2準位間の振動はRabi振動と呼ばれる。理想状態であればこのような量子状態、すなわちコヒーレンスは維持され、振動は永遠に続いてサイン波として観測されるが(図4 (a))、実際にはダイヤモンドNVセンターの不純物や外部環境などからのノイズによってコヒーレンスが失われることになる。今回開発したパルス量子センサーモジュールを用いてRabi振動を測定したところ、時間が経つにつれてコヒーレンスが消失し、振幅が減少している様子が観測された(図4 (b))。

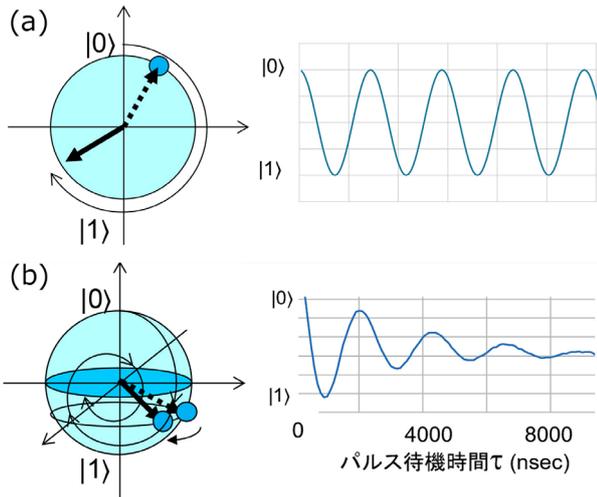


図4 Rabi振動測定
(a) 理想的なシミュレーション波形、(b) 不純物・外部ノイズを伴った実際の測定値

このRabi振動の測定結果から、マイクロ波を900 nsec照射し続けることで、電子スピンを発光しない $m_s=1$ の準位にそろえることが可能であるという重要な情報が得られた。この量子操作は、位相空間に

おいて $\theta=180$ 度回転したことに相当するため π パルス(ラジアンで表現)と呼ばれ、発光のコントラスト変化を最大化できる操作である。

ここで量子モジュールを用いたCWモードでのODMR (CW-ODMR) とPulsed-ODMRを比較する。図5 (a) に示すように、マイクロ波を連続的に照射するとダイヤモンドNVセンターの電子スピンは回転を続け、発光する $m_s=0$ と発光しない $m_s=1$ の存在確率は50%ずつになる。そのため、CW-ODMRのスペクトルでは細かいピークを確認できず、高い磁気感度を得ることは困難になる。一方、図5 (b) に示すように、正確に π パルスを照射するPulsed-ODMRでは最高のコントラスト変化が得られるため、CW-ODMRと全く同じ光学系条件、マイクロ波パワー、ダイヤモンドを使用しても、明確なピークが確認できた。ODMRでは磁界強度1mT当たり28 MHzのゼーマン分裂が起こるため、パルス化によって高感度の磁界測定ができることが分かる。

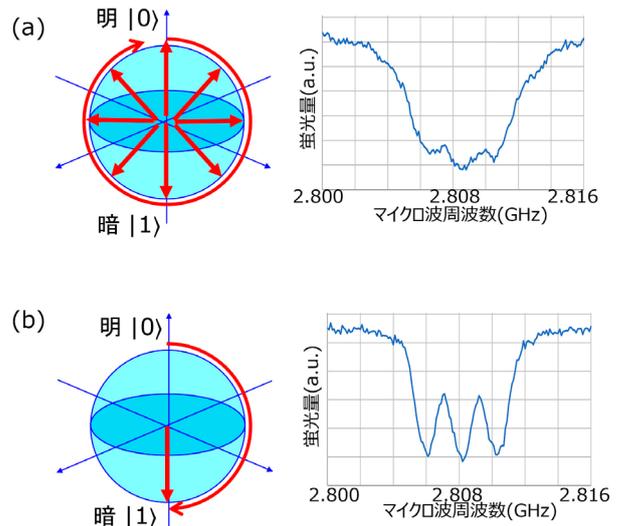


図5 CW-ODMRとPulsed-ODMRの違い

(3) Ramsey法

次に、代表的な量子計測法であるRamsey法について説明する。この手法はPulsed-ODMR法とは異なり、 $\theta=90$ 度、すなわち $\pi/2$ パルスを電子スピンの照射することで $m_s=0$ と 1 の重ね合わせ状態を作る(図6 (a))。量子の重ね合わせ状態は極めて周囲の環境に敏感なため、Pulsed-ODMRより更に高精度に磁界、電界、および温度を感じ取ることができる。この時の量子状態の変化はブロッホ球上ではxy平面上の回転として表現され、2回目の $\pi/2$ パルスで重ね合わせ状態から解放することで、xy平面上の回転に応じた $m_s=0$ と 1 の存在確率を読み取ることができる。

パルス量子モジュールはマイクロ波の位相シフトを備え、電子スピンをx軸周りに時計回りに回転させるだけでなく、反時計回りに回転させることもできるため、発光／非発光の推移を反転させることが可能である（図6（c））。このデータ処理により、励起レーザーの温度やさまざまな環境によるドリフト等をキャンセルし、更に高精度な測定データを得ることが可能である。

(4) Hahn-Echo法

最後に紹介する量子計測法はHahn-Echo法である。この手法は、まず、Ramsey法のように $\pi/2$ パルスで重ね合せ状態を作り、次に π パルスを照射して量子状態を反転させ、最後に読取用の $\pi/2$ パルスを照射する方法である（図6（b））。このように途中で量子状態を反転させることで、直流成分などの外乱を打ち消すことができ、パルス間隔 τ に対応した目的の周波数成分の交流磁界のみを高精度に測定することが可能である（図6（d））。

シリコン半導体や超伝導などを使った量子コンピュータの開発が進んでいるが、それらは極低温（場合によってはmK（ミリケルビン）まで）の冷却と温度維持のため、何重にも及ぶ冷却機構や熱流入を防ぐコネクタ類などを有する非常に巨大な構造物が必要となる。それに対し、室温で、かつ極めてコンパクトなデバイスで量子操作をできるのはダイヤモンドNVセンターのみといえる。本稿で説明したRamsey法やHahn-Echo法は量子コンピュータにおけるNOTゲートやHadamard（アダマール）ゲート⁽⁵⁾などと同様のプロットホ球上でのスピン操作の一例である。ダイヤモンドNVセンターによる量子ドットの形成法にはまだ確率論的な面があるため、工業的に応用するには乗り越えなければならないハードルが多く残されている。しかしながら、その室温での長いコヒーレント時間は他の追随を許さず、将来、個人が携帯できるような量子コンピュータや量子暗号通信デバイスの可能性の扉を開くものと考えられる。

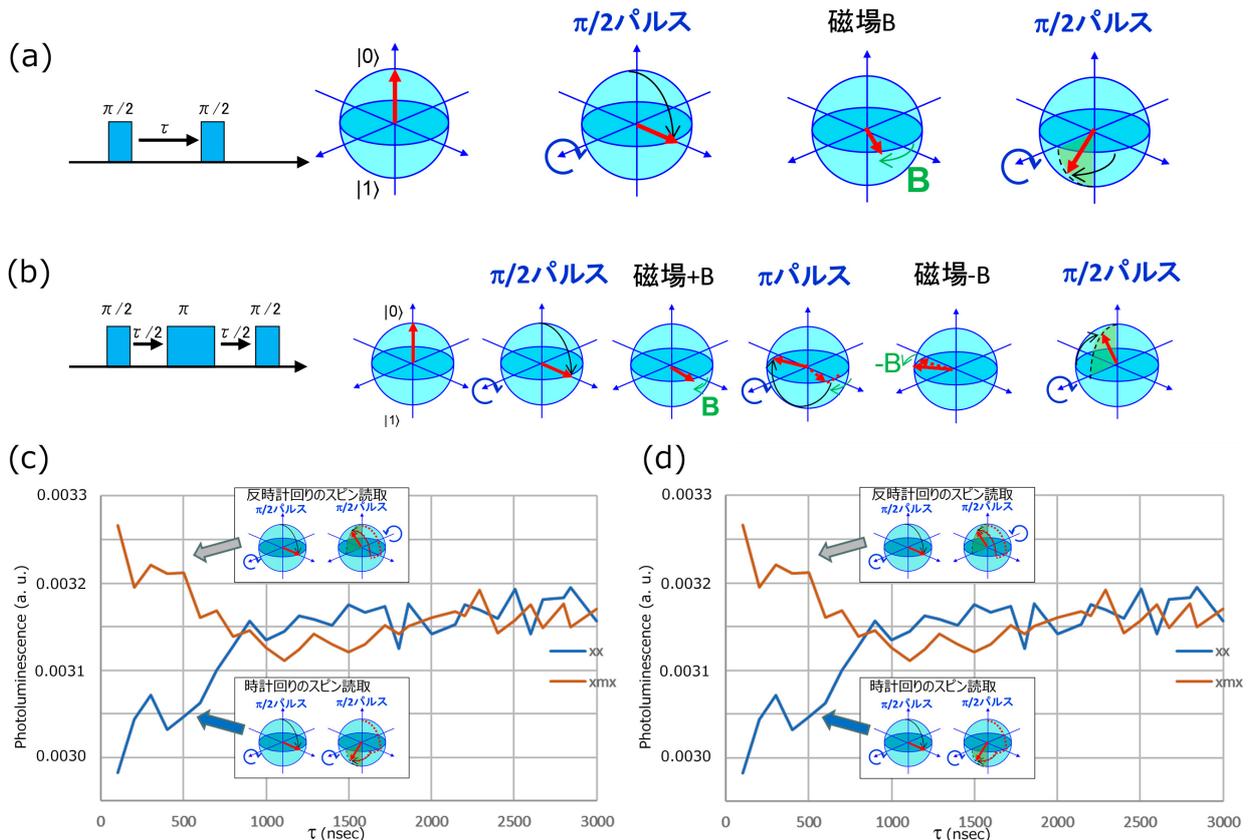


図6 Ramsey法およびHahn-Echo法

赤の矢印はスピンの向き、黒の矢印はマイクロ波によるスピンの回転の方向、Bは磁場、緑の矢印は、磁場B（緑色）の強さに応じたスピンの回転方向を示す。

(a) Ramsey法による高感度磁界測定のパルスのかけ方とプロットホ球上のスピンの挙動、(b) Hahn-Echo法による高感度交流磁界測定のパルスのかけ方とプロットホ球上のスピンの挙動、(c) Ramsey法の時計回りと反時計回りの $\pi/2$ パルスの読取波形、(d) Hahn-Echo法の時計回りと反時計回りの $\pi/2$ パルスの読取波形。

4. 結言

ダイヤモンドNVセンターで量子操作を可能にする可搬型かつ低消費電力のパルス量子モジュールを開発した。本モジュールを用いたパルス法によりRabi振動、ODMR、Ramsey法、Hahn-Echo法などの量子操作を行うことで、従来のCW法と比べて高感度測定ができることを示した。これらの技術がダイヤモンド磁気センサーの社会実装に資することを期待する。

5. 謝辞

東北大学先端スピントロニクス研究開発センタースピントロニクス学術連携研究教育部門に謝意を申し上げます。

参考文献

- (1) K. Arai et al., Commun. Phys. 5, 200 (2022).
- (2) R. Igarashi et al., Nano Lett. 12, 5726 (2012).
- (3) B. S. Miller et al., Nature 587, 588 (2020).
- (4) Y. Hatano et al., Sci Rep. 12, 13991 (2022).
- (5) P. Neumann et al., Nature Phys. 6, 249 (2010).
- (6) K. Tsurumoto et al., Commun. Phys. 2, 74 (2019).
- (7) 左亦康ら, 住友電気テクニカルレビュー 198, 67 (2021).
- (8) H. Deguchi et al., Appl. Phys. Express 16, 62004 (2023).
- (9) F. M. Stürner et al., Diam. Relat. Mater. 93, 59 (2019).
- (10) Z. Yuan et al., Am. J. Phys. 92, 892-900 (2024).
- (11) 日新電機ニュースリリース2024年3月29日. 「ダイヤモンドNVセンターを用いたポータブルで低消費電力なパルス量子センサモジュールを開発」

執筆者紹介



辰巳 夏生 Tatsumi Natsuo
住友電気工業株式会社
日新住電エネルギーシステム開発センター
主幹 グループ長 博士(工学)



中尻 佳秀 Nakajiri Yoshihide
住友電気工業株式会社
日新住電エネルギーシステム開発センター



出口 洋成 Deguchi Hiroshige
住友電気工業株式会社
日新住電エネルギーシステム開発センター
主幹 技術士(電気電子部門)



藤原 正規 Fujiwara Masanori
京都大学 化学研究所
特定研究員 博士(理学)



林 司 Hayashi Tsukasa
住友電気工業株式会社
日新住電エネルギーシステム開発センター
参与 博士(工学)



森下 弘樹 Morishita Hiroki
東北大学
先端スピントロニクス研究開発センター
材料科学高等研究所 准教授 博士(工学)



清藤 紘矢 Saito Hiroya
住友電気工業株式会社
日新住電エネルギーシステム開発センター



水落 憲和 Mizuochi Norikazu
京都大学 化学研究所
スピントロニクス学術連携研究教育センター
教授 博士(理学)