

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01472

研究課題名（和文）ワイドギャップパワーデバイスの量子センシング技術の基盤構築

研究課題名（英文）Quantum sensing of wide bandgap power devices

研究代表者

岩崎 孝之（Iwasaki, Takayuki）

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：80454031

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、次世代低損失パワーデバイス実現に向けた量子センシングの基盤技術の開発を行った。ダイヤモンドデバイス内において、窒素-空孔（NV）センターを用いた新たな電界ベクトル計測の手法を提案し、逆バイアス印加下においてデバイス内の電界ベクトル計測に成功した。さらに、量子発光構造を用いた温度計測やNVセンターの電気的検出に関する基盤技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パワーデバイスは社会の様々なシステムにおいて使用される半導体素子である。ダイヤモンドはその優れた物性から次世代の低損失パワーデバイスを形成する材料として期待されており、その動作の信頼性などをモニタリングする手法は重要となる。本研究で開発したダイヤモンドデバイスの量子センシング技術は、デバイス動作理解の新たな知見を与えることが期待でき、今後のダイヤモンドパワーデバイス技術の発展に寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed basic technologies of quantum sensing for realization of next-generation low loss power devices. In a diamond device, we proposed a novel method to measure electric field vectors using NV centers in diamond, and then, we demonstrated the measurements under the reverse voltage operation. Furthermore, we developed sensing technologies of temperature measurements and electrical detection.

研究分野：電気電子材料・量子技術

キーワード：量子センサ NVセンター パワーデバイス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

パワーデバイスとは自動車、鉄道、さらに送電など様々なシステムにおいて使用される半導体素子である。現在、主にシリコンがパワーデバイスに用いられているが、さらなる省電力化に向け、ワイドバンドギャップを有する半導体である 4H-SiC、GaN およびダイヤモンドを利用したパワーデバイスの開発が進められている。このうち、ダイヤモンド半導体は高絶縁破壊電界強度 (10 MV/cm) や高熱伝導率 (20 W/cmK) などの優れた物性を有するため、次世代の低損失パワーデバイスを形成する材料として期待されている。しかしながら、新しい半導体材料を用いたパワーデバイスの実用化にとって、デバイス動作の信頼性や再現性は大きな課題である。パワーデバイスは電界集中などの異常動作により動作不良を起こすため、その様々な物理現象を高精度・高分解能かつ定量的にモニタリングする手法が求められている。

2. 研究の目的

本研究ではダイヤモンド中の窒素 - 空孔 (NV) センターや量子発光構造を用いることでダイヤモンドパワーデバイスで発生する物理現象を計測する手法を開発する。ダイヤモンド中の微小な発光構造を用いることで高分解能計測が可能であり、さらに複数の発光構造 (アンサンプル状態) を利用することでイメージングやベクトルセンシングなどを実施する。デバイス内部で発生する電界などを計測する技術を開発し、次世代低損失パワーデバイス実現に向けた量子センシングの基盤技術を確立することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究で用いる量子センサは、ダイヤモンドの格子中で不純物原子と空孔からなる複合欠陥である。NV センターは、隣り合う窒素原子と空孔からなる原子レベルの構造であり、室温において安定した電子スピン操作が可能である。スピンレベルは電界などの環境によって変化するため、その変化を光検出磁気共鳴 (ODMR) スペクトル計測により検出する。多数の NV センターを内包することで、CCD を検出器として用いたイメージング計測を実施した。さらに、デバイス構造を利用した電氣的検出技術の開発も行った。また、NV センター以外の量子発光構造として、鋭いゼロフォノン線を有する IV 族元素からなる複合欠陥を利用し、温度による発光の特性変化を用いた温度センシングの基盤技術開発を行った。本研究では、デバイス内への NV センターの形成、量子センシング計測系の構築および新たな計測技術の開発を実施した。

4. 研究成果

アンサンプル NV センターを用いた新たな電界ベクトル計測手法を提案し、デバイス内部において測定を実施した (図 1, B. Yang et al., Phys. Rev. Applied 14, 044049, 2020.)。NV センターはダイヤモンドの結晶内に形成されるため、N-V 結晶軸は 4 方向あり、複数軸を利用することでベクトル計測が可能となる。しかしながら、信号を分離するために印加する静磁場が N-V 軸に対して平行方向になると、電界による信号の変化量を著しく低下させてしまう。本研究では、この課題を解決するための新たな計測手法を開発した。まず、計測に利用する複数の N-V 軸をターゲット NV センターとして選定する。そのうちのひとつの N-V 軸に垂直な静磁場を印加し、さらにデバイスに電圧をかけることで電界を発生させる。ここで量子センシング計測を行うことで、このひとつの N-V 軸に垂直な電界を計測する。次に、別のターゲット N-V 軸に変え、上記プロセスを繰り返すことで複数の N-V 軸に対する電界情報を得ることができ、電界ベクトルを評価可能となる (図 1a)。

本手法の有効性を検証するために、理論的な解析を行った。4.1 mT の静磁場下で 1.1 MV/cm の電界が印加された場合、N-V 軸に平行な静磁場では電界による信号の変化が 3 MHz であるのに対し、本研究の手法である N-V 軸に垂直な静磁場を与える場合は、電界による信号変化は 10 倍の約 30 MHz と大幅に増加することがわかった。

測定には (111) 面を有する p 型ダイヤモンド基板上に形成したダイヤモンド縦型 p-i-n ダイオードを用いた。i 層の上にパターン形成した n 型層を有する構造となっている。窒素イオン注入および高温アニールによって、デバイス中に NV センターを形成した。電界計測は、光学アクセス可能な真空チャンパー中で行った。532 nm の緑色レーザーを用いて NV センターを励起し、NV センターからの蛍光を CCD によって検出した。スピン操作のためのマイクロ波は、Cu 製の細いワイヤから放射させた。p-i-n ダイオードに 400 V までの逆方向電圧を印加し、デバイス内部に発生する電界ベクトルを計測した。ターゲット NV として [111] 方向と $[\bar{1}\bar{1}1]$ 方向の 2 種類の NV センターを選び、横方向電界 E_x および縦方向電界 E_z を評価した。

まず、ひとつの N-V 軸に対して垂直な静磁場を印加しながら、異なる逆方向電圧 (0, 200 V, 400 V) において ODMR スペクトルを計測した。電圧が増加するほどスプリット幅が増加しており、本手法によってデバイス内部の電界を計測可能なことを確認した。次に、それぞれの N-V 軸に対して垂直な静磁場および電界を印加することで電界ベクトル計測を実施した。両軸とも、パ

ターン形成した n 型層のエッジに近づくほど ODMR 信号のスプリット幅が増加した。これは、n 型エッジにおいて電界が集中していることを意味している。縦方向の電界の影響を強く受ける N-V 軸において、ODMR スペクトルの分裂幅がより大きくなった。これは、使用した p-i-n ダイオードにおいて、縦方向の電界が強く発生しているためだと考えられる。観測されたそれぞれの軸の NV センターのスプリット幅を解析することで E_x および E_z 、さらに電界ベクトルの位置依存性を評価した(図 1b-d)。 E_x および E_z は窒素ドナーを考慮に入れたデバイスモデルによるシミュレーションと良く一致しており、本研究による新たな電界ベクトル計測手法が機能していることを確認した。電界のエラーは、NV センターにかかっているストレスが原因である。また、別のダイヤモンドデバイス中に等間隔で形成した NV センサアレイを CCD で検出することで測定系の高い空間分解能を確認したが、電界計測時においては光軸方向に少しのドリフトが発生していたため空間分解能はマイクロメートルオーダーであると考えられる。

デバイス中の温度変化を計測する技術として、ダイヤモンド中の IV 族 - 空孔センターを利用した計測手法を開発した。温度が高くなるほどゼロフォノン線の波長は長波長側へシフトするため、蛍光の強度変化を計測することで温度計測を実施した。本研究では、ゼロフォノン線の一部を狭いバンドパスフィルタを通して計測することで、温度変化による蛍光強度の変化として温度を計測できる手法を開発した。量子光源からの蛍光を狭いバンド幅のバンドパスフィルタを通過後に計測し、温度上昇に伴って蛍光強度が変化することを確認した。したがって、本手法によってナノスケールの空間分解能で温度計測することが可能である。

NV センターのスピン状態を光で検出する手法に対し、レーザによって励起されたキャリアを電流として計測することで電気的に読み出すことも可能である。この電気的検出技術は、検出に光学素子を利用しないためにシステムの小型化に適しているということに加え、高精度電極形成と組み合わせることでさらなる高空間分解能計測につながる可能性を有している。一方、電気的検出では光電流が小さいという課題がある。本研究では、キャリアの増倍が可能な p-i-n ダイオードを用いた電気的検出を行い (T. Murooka et al., Appl. Phys. Lett. 118, 253502, 2021.) さらに高電界印加による光電流の増倍を行った。使用したデバイスは、ダイヤモンド横型 p-i-n ダイオードであり、デバイス内部にイオン注入およびアニールによって NV センターを形成した。

レーザによって励起された NV センター中の電子は、2 つの光子を吸収することでダイヤモンドの伝導帯に励起される。その光キャリアを電極で収集することで電流が流れるために電気的に検出が可能となる。デバイスの p 層付近の NV センターを励起することによって発生させた光キャリアは、デバイスに外部電圧を印加しない場合でも光電流として出力されることを確認した。これは、ドーピングの異なる半導体接合部の内蔵電位によって、キャリアを効率的に収集できているためである。光電流の p 層からの距離依存性を計測することで、NV センターから発生した光キャリアの拡散長の見積もりを実施した。イオン注入領域で発生している欠陥の影響を見るために、異なる深さでの測定を実施し、浅い領域に比べ、深い領域での拡散長が短くなることを見出した。これは、空乏層に到達する前の光キャリアの経路によるものだと考えられる。浅い領域で発生した光キャリアは、最も欠陥の多いイオン注入の飛程に対応する領域を通過する必要がないのに対し、深い領域で発生した光キャリアは、空乏層に到達して電極に収集される前に欠陥の多い領域を通過する必要がある。よって、キャリアの再結合が発生するために拡散長が短くなったと考えられる。拡散長の情報は、量子デバイスの集積化やデバイスセンシングにおいて重要な知見になるものである。さらに、NV センターのスピン状態を電気的に読み出す光電検出磁気共鳴 (PDMR) 測定を実施した。磁場がない場合は、約 2.87 GHz にひとつのディップがあるのに対し、磁場印加時にはピークが分裂しており、電気的検出においても量子センサとして機能することを確認した。さらに、p-i-n ダイオードに逆方向バイアスを印加しながら光電流を検出することで、急激な光電流の増加を観測した。これは光キャリアが高電界によって増倍されているためだと考えられる。この技術は、高感度固体量子センサ形成やデバイス内部情報のさらなる高精度・高空間分解能検出手法の発展に貢献するものと期待できる。

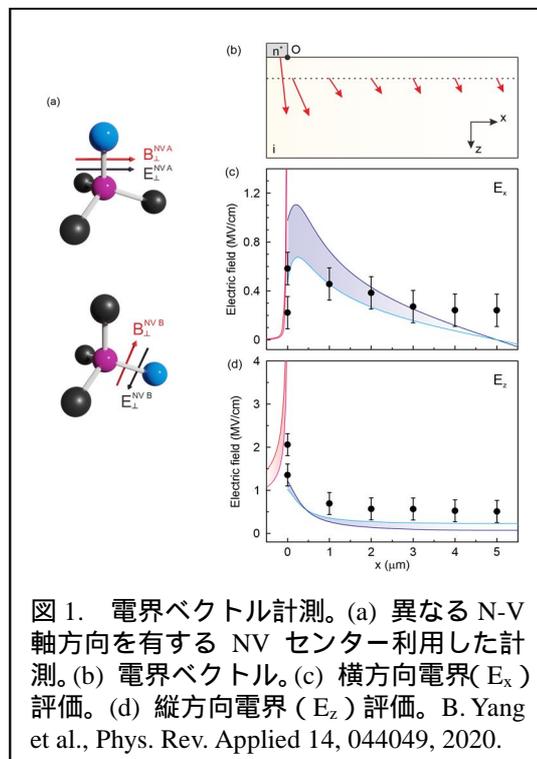


図 1. 電界ベクトル計測。(a) 異なる N-V 軸方向を有する NV センター利用した計測。(b) 電界ベクトル。(c) 横方向電界 (E_x) 評価。(d) 縦方向電界 (E_z) 評価。B. Yang et al., Phys. Rev. Applied 14, 044049, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 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, T. Iwasaki	4. 巻 118
2. 論文標題 Photoelectrical detection of nitrogen-vacancy centers by utilizing diamond lateral p-i-n diodes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 253502-1 - 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0055852	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Bang Yang , Takuya Murooka , Kosuke Mizuno, Kwangsoo Kim, Hiromitsu Kato, Toshiharu Makino, Masahiko Ogura, Satoshi Yamasaki, Marek E. Schmidt, Hiroshi Mizuta, Amir Yacoby, Mutsuko Hatano, and Takayuki Iwasaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Vector Electrometry in a Wide-Gap-Semiconductor Device Using a Spin-Ensemble Quantum Sensor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW APPLIED	6. 最初と最後の頁 044049-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.14.044049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kosuke Mizuno , Makoto Nakajima, Hitoshi Ishiwata , Mutsuko Hatano, and Takayuki Iwasaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Electron spin contrast of high-density and perfectly aligned nitrogen-vacancy centers synthesized by chemical vapor deposition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 032001-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abd868	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takuya Murooka , Junya Yaita, Toshiharu Makino, Masahiko Ogura, Hiromitsu Kato, Satoshi Yamasaki, Meralys Natal, Stephen E. Saddow, Takayuki Iwasaki, Mutsuko Hatano	4. 巻 67
2. 論文標題 Characterization of Schottky Barrier Diodes on Heteroepitaxial Diamond on 3C-SiC/Si Substrates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES	6. 最初と最後の頁 212 - 216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TED.2019.2952910	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 岩崎 孝之
2. 発表標題 ダイヤモンド量子技術
3. 学会等名 nano tech 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩崎 孝之
2. 発表標題 格子欠陥を用いたダイヤモンド量子技術
3. 学会等名 応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第21回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩崎 孝之
2. 発表標題 ダイヤモンドNV量子センサの基礎と応用
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会 チュートリアル
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 室岡 拓也、椎貝 雅文、Hoang Minh Tuan、水野 皓介、加藤 宙光、牧野 俊晴、小倉 雅彦、山崎 聡、波多野 睦子、岩崎 孝之
2. 発表標題 pinダイオードを用いたNVセンターの電氣的読み出し
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Takuya Murooka, Masafumi Shiigai, Yuma Hironaka, Tuan Minh Hoang, Hiromitsu Kato, Toshiharu Makino, Masahiko Ogura, Satoshi Yamasaki, Mutsuko Hatano, and Takayuki Iwasaki
2 . 発表標題 Photoelectrical Detection of NV Centers Utilizing Lateral p-i-n Diode
3 . 学会等名 The 3rd International Forum on Quantum Metrology and Sensing (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 M. Shiigai, T. Murooka, Y. Hironaka, T. M. Hoang, T. Makino, H. Kato, M. Ogura, S. Yamasaki, M. Hatano, and T. Iwasaki
2 . 発表標題 Evaluation of magnetic sensitivity of photoelectrical detection of NV centers in a lateral diamond p-i-n diode
3 . 学会等名 The 3rd International Forum on Quantum Metrology and Sensing (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Takayuki Iwasaki, Takuya Murooka, Bang Yang, Masafumi Shiigai, Motoki Nakamura, Hiromitsu Kato, Toshiharu Makino, Masahiko Ogura, Satoshi Yamasaki, Mutsuko Hatano
2 . 発表標題 NV Quantum Sensors in Diamond Electronic Devices
3 . 学会等名 The 2nd International Forum on Quantum Metrology and Sensing (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Bang Yang, Motoki Nakamura, Takuya Murooka, Toshiharu Makino, Hiromitsu Kato, Masahiko Ogura, Satoshi Yamasaki, Mutsuko Hatano, and Takayuki Iwasaki
2 . 発表標題 Nanoscale Sensing of Vector Electric Field in Diamond pin Diode
3 . 学会等名 The 2nd International Forum on Quantum Metrology and Sensing (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Murooka, Masafumi Shiigai, Yang Bang, Toshiharu Makino, Hiromitsu Kato, Masahiko Ogura, Satoshi Yamasaki, Mutsuko Hatano, and Takayuki Iwasaki
2. 発表標題 Photoelectrical Detection of NV Centers Utilizing a pin Diode
3. 学会等名 The 2nd International Forum on Quantum Metrology and Sensing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Murooka, Masafumi Shiigai, Bang Yang, Toshiharu Makino, Hiromitsu Kato, Masahiko Ogura, Satoshi Yamasaki, Mutsuko Hatano, and Takayuki Iwasaki
2. 発表標題 Efficient electrical readout of NV Centers using a diamond p-i-n diode
3. 学会等名 Hasselt Diamond Workshop 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 B. Yang, M. Nakamura, T. Murooka, K. Mizuno, T. Makino, H. Kato, M. Ogura, S. Yamasaki, M. Hatano, T. Iwasaki
2. 発表標題 Nanoscale vector electrometry using nv centers in a diamond device
3. 学会等名 Hasselt Diamond Workshop 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須田 弘平, 室岡 拓也, 楊 棒, 汪 鵬, 加藤 宙光, 牧野 俊晴, 小倉 政彦, 山崎 聡, 谷口 尚, 波多野 睦子, 岩崎 孝之
2. 発表標題 ダイヤモンド横型pn接合ダイオードを用いたGeVセンターの電気励起
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 椎貝 雅文, 室岡 拓也, 楊 棒, 牧野 俊晴, 加藤 宙光, 小倉 政彦, 山崎 聡, 波多野 睦子, 岩崎 孝之
2. 発表標題 デバイス構造を用いたダイヤモンド中NVセンタの光電流検出
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 室岡拓也、楊棒、椎貝雅文、牧野俊晴、加藤宙光、小倉政彦、山崎聡、波多野睦子、岩崎孝之
2. 発表標題 ダイヤモンドNVセンターの電氣的読み出しに向けたpin構造による光電流の検出
3. 学会等名 第33回ダイヤモンドシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩崎孝之
2. 発表標題 ダイヤモンドの可能性を追求したセンサデバイス開発
3. 学会等名 公益財団法人大田区産業振興協会 第96回東京工業大学技術交流セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kim, K. Mizuno, T. Makino, H. Kato, M. Ogura, D. Takeuchi, S. Yamasaki, M. Hatano, T. Iwasaki
2. 発表標題 Quantum Electric-Field Imaging of Diamond Devices Using Nitrogen-Vacancy Centers
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 楊棒、金光秀、マレク・シュミット、牧野俊晴、加藤宙光、小倉政彦、竹内大輔、山崎聡、水田博、波多野睦子、岩崎孝之
2. 発表標題 ダイヤモンドJFETの高電界強度計測へ向けた量子センサアレイの形成
3. 学会等名 第32回ダイヤモンドシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金光秀、水野皓介、牧野俊晴、加藤宙光、小倉政彦、竹内大輔、山崎聡、波多野睦子、岩崎孝之
2. 発表標題 NVセンタによるパワーデバイスの内部電界イメージング
3. 学会等名 第79回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Nakamura, T. Murooka, M-T. Hoang, E. A. Ekimov, M. Hatano, T. Iwasaki
2. 発表標題 Temperature Sensing Using Group-IV Color Centers in Diamond
3. 学会等名 The 3rd International Forum on Quantum Metrology and Sensing (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	波多野 睦子 (Hatano Mutsuko) (00417007)	東京工業大学・工学院・教授 (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Harvard University			
米国	南フロリダ大学			
ロシア連邦	Institute of High Pressure Physics			