

氏名	Gaicomano Mariani
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第10482号
学位授与年月日	令和4年5月31日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	Measurement systems for the control of the electron spins in nitrogen-vacancy centers in diamond at room and low temperatures (ダイヤモンド窒素-空孔中心電子スピン制御のための室温及び低温における測定システム)
主査	筑波大学教授 博士(工学) 大野 裕三
副査	筑波大学教授 理学博士 黒田 眞司
副査	筑波大学教授 博士(学術) 都倉 康弘
副査	筑波大学教授 博士(理学) 櫻井 岳暁
副査	筑波大学准教授 博士(理学) 野村 晋太郎

論文の要旨

審査対象論文は、ダイヤモンド窒素-空孔(NV)中心電子スピンを制御して高感度の量子センシングを行うことを目的として、室温及び低温における新たな測定システムを設計・構築し、その性能を評価し、検討を加えたものである。ダイヤモンド NV 中心電子スピンは、常温においてマイクロ波パルスを用いてスピン状態をコヒーレントに制御することが可能であることが知られ、単一 NV 中心では 1 ms 以上のコヒーレンス時間 T_2 が示されており、量子センシングのためのプラットフォームの有力な候補として、大きな注目を集めている。NV 中心電子スピン状態の読み出しには NV 中心からの発光が主に用いられるが、単一 NV 中心からの発光は微弱であるため高速に高感度にセンシングを行うことは実際上困難であった。そこで、多数の NV 中心、すなわちアンサンブル NV 中心を用いて高感度にセンシングを行うための研究が、ダイヤモンド試料の材料開発、測定手法の開発の両面からこれまで精力的に進められてきた。

以上の背景のもとで審査対象論文は、アンサンブル NV 電子スピンを制御するためにマイクロ波パルスを広い範囲で高い効率で照射する新たな測定手法を考案し、その性能を実証したものである。第1章では、当該分野のこれまでの研究の背景が述べられ、本研究に至った動機が述べられている。

第2章では、アンサンブルダイヤモンド NV 中心のパルス磁気共鳴を測定するためのコンパクトでポータブルなシステムを開発し、その性能を評価した結果について述べられている。このシステムはプリント基板上に実装されたマイクロ波制御モジュールから構成され、全体のサイズが $20 \times 40 \times 10 \text{ cm}^3$ に収められているものである。小さな入力マイクロ波電力でダイヤモンド NV 中心電子スピンの高いラビ周波数を得るための平面マイクロ波アンテナ構造を考案し、設計・製作した。製作された測定システムの性能評価がなされ、 $7 \text{ MHz}/\sqrt{\text{W}}$ の高い効率で NV 中心電子スピンのラビ振動を駆動可能であることが実証されたことが

述べられている。パルス光学検出磁気共鳴(ODMR)測定、スピンエコー測定等が実際に可能であることが示されている。

第3章では、広視野光学顕微鏡を用いたテーブルトップ測定システムを用いて、高いラビ周波数を得るためのマイクロ波アンテナ、マイクロ波共振器の設計と製作、その評価について述べられている。このシステムは第2章で述べられたシステムと比較して大型となるが、量子センシングシステムとして高い性能を発揮する。平面マイクロ波アンテナから空間的に均一なマイクロ波をシリコン基板上に作製した金細線構造に照射し、マイクロ波磁場の近接場増強を利用して高いラビ周波数を得る方法が考案され、その特性を評価した結果について述べられている。広視野光学顕微鏡に取り付けられた CMOS カメラを用いて取得した発光イメージの時系列をフーリエ変換することにより、金細線構造まわりのマイクロ波振動磁場強度をラビ周波数の空間分布として取得可能であることに本測定システムの特徴がある。金細線構造まわりのマイクロ波振動磁場強度を調べた結果、マイクロ波が局所的に振幅で 22 倍、強度で 480 倍に増強されることが示されている。また、新規のアイデアに基づく平面マイクロ波アンテナの構造を設計、製作し、257 MHz/ \sqrt{W} の高い効率で NV 中心電子スピンのラビ振動を駆動可能であることが実証されたことが述べられている。

第4章では、ヘリウム温度である 4 K 近傍でアンサンブルダイヤモンド NV 中心のパルス ODMR 測定を行うための新たな測定システムを設計・構築したことについて述べられている。低温に測定温度範囲を拡大することにより、例えば第2種超伝導体の評価が可能となる等、量子センシングの応用範囲が広がることが期待される。無冷媒ヘリウムクライオスタット中に発光検出のための光学顕微鏡、磁場印加のための3軸超伝導ヘルムホルツコイルを新たに設計、製作した。シリコン基板上の金細線やプリント基板に作製された平面マイクロ波共振器がマイクロ波印加のために用いられたことが述べられている。実際に、4 K 近傍で ODMR スペクトルが測定され、この測定システムの有効性が示されたことが述べられている。

以上により、本論文で提案されたマイクロ波パルスを広い範囲で高い効率で照射する新たな測定手法の優位性が示されたことが述べられている。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

本論文は、アンサンブルダイヤモンド NV 中心を用いた量子センシングのために、室温及び低温における新たな測定システムを設計・構築し、その性能を評価し、検討を加えたものである。アンサンブルダイヤモンド NV 中心を用いた量子センシングには、空間的に広い範囲にマイクロ波を印加することが求められる。また、効率よく必要な部分に強いマイクロ波を照射し、測定対象の温度上昇を抑制することが求められる。従来、マイクロ波照射にはコプレーナ導波路やマイクロストリップ線路、平面アンテナ等が用いられてきた。本研究では、シリコン基板上の金細線やプリント基板に作製された平面マイクロ波共振器と平面アンテナを組み合わせ、マイクロ波照射範囲を近接場を用いて制御する手法を導入した点に新規性があり、高く評価される。特に、シリコン基板上の金細線周りの近接場を活用した手法ではラビ周波数から評価したマイクロ波振幅が通常の22倍、マイクロ波電力が 480 倍に増強されることが第3章で示された。この結果は、試料の温度上昇を伴わないように高効率でマイクロ波パルスを照射することを可能とし、

アンサンブルダイヤモンド NV センターを用いた量子センシングの測定感度の向上に大きく寄与した。この手法は、量子スピンの局所的な制御、マイクロ波デバイスやメタマテリアル素子の評価、誘電率の差を利用したマイクロ波バイオイメージング等へ広く活用されることが期待される。

第2章で述べられたアンサンブルダイヤモンド NV 中心のパルス磁気共鳴を測定するためのコンパクトでポータブルなシステムによって、心磁図の測定等の可搬であることによる利便性の向上、応用範囲の拡大が見込まれる。第4章ではヘリウム温度で測定するためのシステムについて述べられたが、低温での測定では試料の温度上昇を避けるために、外部から大きな電力のマイクロ波を入力することは制限されている。そのため、本研究で開発された高効率マイクロ波共振器を用いる手法はたいへん有用であり、広い応用が見込まれる。低温ではダイヤモンド NV センター電子スピンの縦緩和時間 T_1 が長くなることが知られ、低温で測定することにより、量子センシングの測定感度が大きく向上することが期待されている。以上のように、本研究により得られた成果は当該研究分野に大きく寄与するものであり、博士論文として相応しい内容のものであると判断する。

〔最終試験結果〕

令和 4年 4月 22 日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。