

1. 評価対象研究課題

- (1) 研究課題名：海底・地下での長距離量子センシングに関する研究
- (2) 研究代表者：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 大島 武
- (3) 研究期間：令和3年度～令和5年度

2. 終了評価の実施概要

実施日：令和6年11月15日

場所：TKP秋葉原カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所 理事長、上席研究員／東京大学 名誉教授

平澤 洽（委員長）

長岡技術科学大学 副学長・教授

井原 郁夫

産業技術総合研究所 執行役員

兼 エネルギー・環境領域 領域長

小原 春彦

東京科学大学 工学院 電気電子系 教授

梶川 浩太郎

東京農工大学 名誉教授

佐藤 勝昭

国立感染症研究所 客員研究員

四ノ宮 成祥

科学技術振興機構 研究開発センター 企画運営室長、フェロー

中山 智弘

情報通信研究機構 電磁波研究所 総括研究員

山本 真之

（委員長以外は五十音順・敬称略）

3. 研究と成果の概要

研究の概要

長距離の量子センシング実現の可否に関わる本質的な課題であるにも関わらず、これまで検討がなされていない「光の減衰」及び「高周波の減衰」に焦点を絞り、以下に示す研究を実施することで課題の解決を目指し、長距離の量子センシングに道を拓くことを目指した。量子センサとなるスピン欠陥に関しては炭化ケイ素（SiC）中のシリコン空孔（ $V_{Si}$ ）及び窒素－空孔（ $N_C V_{Si}$ ）の2つに着目し研究を進めた。光減衰への対応に関しては、近赤外領域を有する SiC 中の  $N_C V_{Si}$  の波長 1300nm での光検

出磁気共鳴 (ODMR) の確認によるスピン制御の達成を図った。また、キャビティを活用した高効率集光と発光増強、及び 1400nm 付近の波長を 700nm とする波長変換技術による  $V_{Si}$  からの 900nm でのフォトルミネッセンス (PL) 観察を試みた。高周波減衰への対応では、レベルアンチクロッシングを応用した 1mT 付近での 900nm の  $V_{Si}$  の PL の急峻な変化による磁場計測といった高周波の長距離伝送を必要としないオール光での量子センシング技術を推進した。

## 成果の概要

本研究では、実験及び理論の両面から「光減衰への対応」、「高周波減衰への対応」といった基盤技術の開発を推進した。研究に不可欠な SiC エピタキシャル膜の作製を進め、高品質 SiC 結晶成長については、炭素 (C) 原料に  $^{12}C$  濃縮ガスを適用することで、 $^{12}C$  濃度が 99.96% の核スピンゆらぎを低減した SiC エピタキシャル膜を作製することに成功した。 $^{12}C$  濃縮 SiC により核スピンを排除することで、ODMR シグナルがシャープになり磁気感度が向上することを見出し、 $V_{Si}$  による超高感度磁場計測に向けては SiC 中の核スピン排除が重要であることを明らかにした。一方、 $N_cV_{Si}$  に関しては、N イオン注入や電子線の照射量や熱処理温度を適切に選択することで  $N_cV_{Si}$  の形成を確認するとともに、ODMR 測定に成功することで、 $N_cV_{Si}$  が量子センサとして応用可能であることを実証した。

$V_{Si}$  や  $N_cV_{Si}$  の量子センサとしての振る舞いを理論的に理解するために、量子センサとしての物性値を第一原理計算から求める計算手法の構築とその適用を行った。その結果、 $V_{Si}$  は半整数角運動量を有する量子スピン欠陥であり、既知の量子センサとは定性的に異なる振る舞いをすることを理論的に提案した。一方で、 $N_cV_{Si}$  は整数角運動量を有する量子スピン欠陥であり、ダイヤモンド NV の量子センサと定性的に同じ振る舞いをすることを理論的に確認した。

光制御によるスピン欠陥からの発光の高輝度化では、光キャビティによる PL 強度の増加及び 1550nm のレーザー光を非線形光学結晶により二次高調波発生させて 775nm の光に変換し、その波長 775nm 光による SiC 中の  $V_{Si}$  の ODMR に成功した。

オール光技術では、強度変調したレーザーを GaAs 基板上に形成した楕型電極に照射することで局所的に高周波を発生させる光電流誘起高周波発生を用いて  $V_{Si}$  の ODMR 測定に成功した。加えて、完全に高周波を用いない「レベルアンチクロッシング」に関しては、磁場中での  $V_{Si}$  の PL 強度を測定することでレベルアンチクロッシングによる発光強度の急激な変化を観測し、磁場センシングが可能であることを実証した。

## 4. 終了評価の評点

AA 想定以上の成果をあげた。
-----------------

## 5. 総合コメント

SiCを使ったセンシングに関して目標を達成した。当初の主題的成果に関する目標を達成するとともに、副次的効果が期待できる成果も複数提示されており、十分な研究成果があったものと評価できる。

当該研究成果により、海洋センシングのみならず、地下センシング、弱磁場でのセンシング、埋設物センシング等、様々な活用への道が拓かれた。また、海洋研究開発機構との新たな研究プロジェクトも開始され、センサのさらなる高度化や実用化に繋がる研究発展も期待できる。

## 6. 主な個別コメント

- ・ SiCの格子欠陥を利用した量子センサを開発した。自然に存在する微弱な磁気をとらえることが可能となった。
- ・ 研究成果に「海底」が出てこない点は研究題目とのミスマッチがあるものの、SiC欠陥を使った素子の開発との点では、十分な成果が得られている。今後の展開も考えられており、応用を期待する。
- ・ 他の研究開発のベースになる成果であるとともに、他のファンディングにも展開され、基礎基盤的な研究として大変良好な取組みであった。
- ・ 特許出願、学術論文、学会発表いずれもなされている。学術論文が複数出版あればなお良かった。
- ・ 研究実施体制及びマネジメントが有効に働いており、研究が効率的に遂行された。