

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03870

研究課題名（和文）ダイヤモンド表面核スピン格子を用いた室温量子シミュレータの基盤構築

研究課題名（英文）Room temperature quantum simulator of diamond surface nuclear lattice

研究代表者

山崎 聡（Yamasaki, Satoshi）

金沢大学・ナノマテリアル研究所・特任教授

研究者番号：80358241

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,200,000円

研究成果の概要（和文）：ダイヤモンドの点欠陥の一つである負の電荷をもつ窒素空孔ペア（NV⁻）は、量子シミュレータのキュービットとなりえる特徴ある光学・スピン状態を有している。NV⁻と周囲の核スピンとの間の磁気的相互作用を検出し、量子シミュレータの基礎となる構造を作製することができる。本プロジェクトでは、そのNV⁻を表面近くに持つ構造を作成することを目標とした。我々のユニークな技術であるアンドープダイヤモンド表面完全平坦面から出発し、表面付近を荒らし、そこに窒素を含むダイヤモンド層を埋め込むことに成功した。また、その層からのNV⁻の発光を確認し、表面付近からの発光であることを確認し、構造作成に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在量子科学技術は、次世代のエレクトロニクスを開く新しい技術として、世界的に研究開発が進められている。一方、ダイヤモンドは材料開発からデバイス技術まで、日本が世界をリードしている技術である。その和集合であるダイヤモンドNV中心による量子技術は、室温動作が可能なることから重要な技術である。本プロジェクトは、そのNV中心を含むダイヤモンド構造を作り込むことを目的としており、特に浅いNV中心は、量子シミュレータを目指す構造として、また、ナノNMRを目指す構造として重要な技術である。本プロジェクトの成果はその可能性を開くものである。

研究成果の概要（英文）：Diamond NV⁻ centers, being a negative color center in diamond, has a unique optical and magnetic properties, which can be a quantum simulator material. In this project, we aim to get a basic technique connecting the diamond quantum simulator structure. We started from the atomically flat diamond surface, which is our unique technique, made rough surface and reform atomically flat surface by covering with N-doped diamond. This structure has shallow NV⁻ centers. We observed isolated optical emission from it. It suggests the success of basic technique for a diamond quantum simulation.

研究分野：量子技術

キーワード：ダイヤモンド 量子シミュレータ

1. 研究開始当初の背景

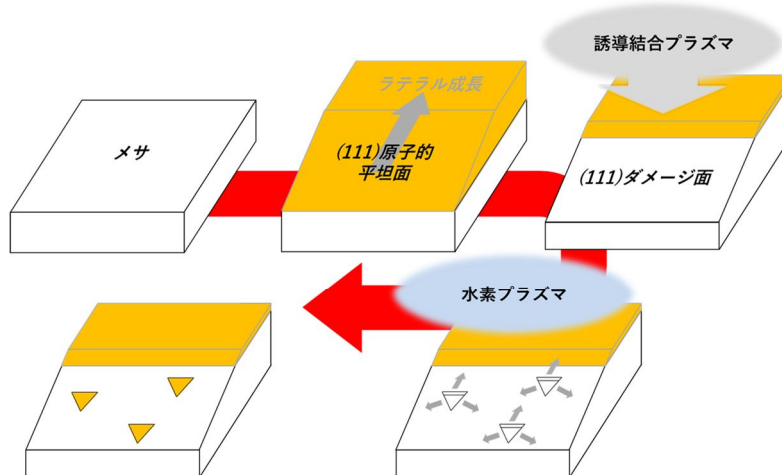
ダイヤモンド NV センタは光、外部磁場（電子スピン・核スピン共鳴線の制御）、マイクロ波（電子スピンの共鳴の制御）、ラジオ波（核スピン共鳴の制御）を使い、室温で、単一のダイヤモンド NV センタのスピン状態を初期化・制御・蛍光を通し読み出すことができる。さらに、NV センタを通し、周囲の核スピンのスピン状態を制御することができる。しかしながら、完全平坦面を持つダイヤモンド表面作製、水素やフッ素による表面終端作製、さらには、表面より数 nm の深さに NV 中心を作り付ける技術は非常に困難である。また、表面終端原子の核スピンと NV センタとの磁氣的相互作用の検出は、世界的に成功していない。完全平坦面を持つダイヤモンド表面から数 nm の浅い深さの空間に NV センタを作製する技術は、チャレンジングなテーマである。

2. 研究の目的

ダイヤモンドの点欠陥の一つである負の電荷をもつ窒素空孔ペア（NV⁻）は、量子シミュレータのキュービットとなりえる特徴ある光学・スピン状態を有している。NV⁻と周囲の核スピンとの間の磁氣的相互作用を検出し、量子シミュレータの基礎となる構造を作製することができる。本プロジェクトでは、その NV⁻を表面近くに持つ構造を作成し、観測することを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、ダイヤモンド表面近傍への NV 中心形成のための新たなプロセスとして、MPCVD によるダイヤモンド表面のナノピットへの窒素ドーパダイヤモンド埋込成長を考案し、その実現を目指した（図1）



4. 研究成果

1) MPCVD におけるダイヤモンド(111)の成長モードの一つであるラテラル成長を利用する。光学的な平坦面を持つ島構造である「メサ」を形成した基板に対し、極めて低いメタン分圧で MPCVD による成長を行うと、メサ表面(111)ステップテラス構造のステップ端が (-1-12) のみに選択的にステップフロー成長していき、その過程でメサ表面に、原子1個分の段差も存在しない原子的平坦面が形成することに成功した（図2）。このプロセスでは、面方位が(111)のダイヤモンドを用いた。ダイヤモンド(111)では単一(111)原子層間の距離である単原子ステップ高さが約 0.21nm となる。これを利用し、ダイヤモンド(111)上に単原子層 10~15 層分（約 2~3nm）の深さを持つ凹構造であるナノピットを、プラズマエッチングプロセスを利用して形成した。次にこのナノピットの領域のみを窒素ドーパダイヤモンド膜でダイレクトに埋め込み、完全平坦面を復元した。この結果、深さ 3nm 未満の領域に NV 中心が形成されていることを AFM により確認した。

図1. 量子シミュレーター用NVセンタ作製プロセス。

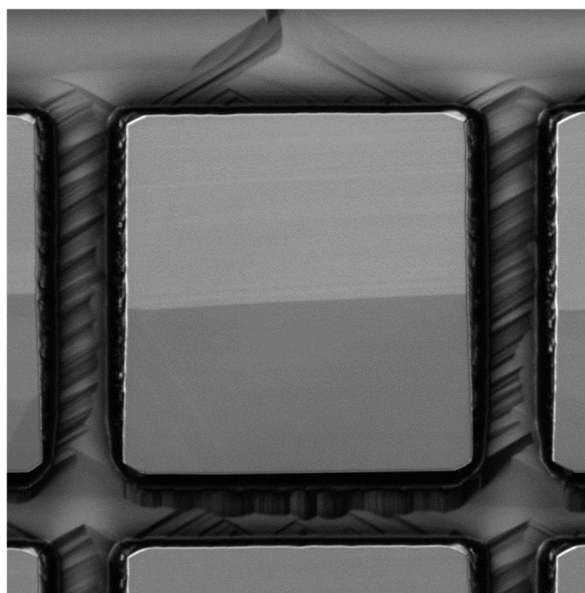


図2. メサ構造に作り付けた完全平坦面。原子的平坦面の形成を確認正方形の形状を持つメサ構造の下部が完全平坦面である。斜面上のRMSラフネスは0.03nmであり、一つの原子上ステップもない平面である。

2) この表面に緑色レーザーを照射し、蛍光を共焦点顕微鏡により観察する。図3に示したのが共焦点イメージである。左下部分に単一の NV-センタからの発光を観測することができた。この NV-センタは、窒素ドーパ製膜前の AFM 測定より、数 nm の深さであることが予想される。現在、深さの定量を進めている。また、本構造を用いることにより、NV 中心から見た外部の原子核の共鳴も得ることができると考えている。

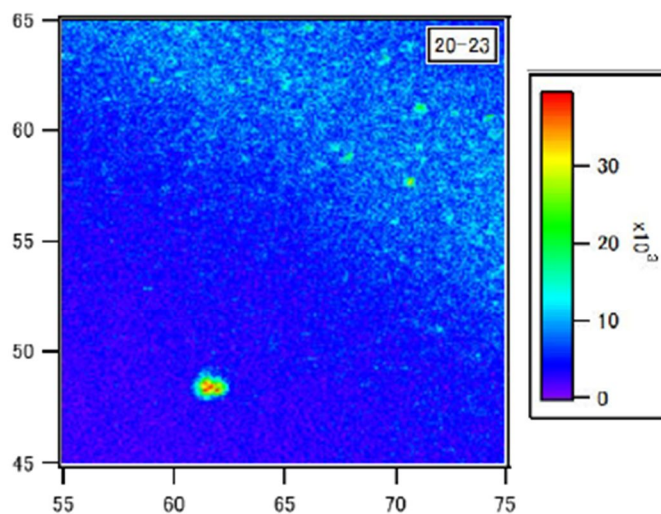


図3. 作り込んだ構造の共焦点イメージ (20 μ m X 20 μ m)。左下にシングルNV-が見える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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	水落 憲和 (Mizuochi Norikazu) (00323311)	京都大学・化学研究所・教授 (14301)	
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)	
研究分担者	徳田 規夫 (Tokuda Norio) (80462860)	金沢大学・ナノマテリアル研究所・教授 (13301)	
研究分担者	牧野 俊晴 (Makino Toshiharu) (20360258)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究チーム長 (82626)	

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