

長谷 宗明

筑波大学数理物質系  
教授

## ダイヤモンドを用いた時空間極限量子センシング

### § 1. 研究成果の概要

本研究では、新規ダイヤモンド光制御技術を基盤とし、フェムト秒領域での分光技術、走査プローブ顕微鏡による原子レベルでの空間分解、ダイヤモンドの精密加工、探針増強ラマン効果による局所物性計測技術を融合し、原子層材料などの新規固体機能素子の評価から蛋白質や細胞の解析までも可能にするマルチプローブ光量子技術、即ち新規ダイヤモンド光機能を用いた時空間極限量子センシング技術を開拓することを目的としている。今年度は、引き続きダイヤモンドカンチレバーを創成するための基礎・基盤研究を中心に、高純度ダイヤモンド結晶への窒素イオン注入および非線形光学効果の評価や、紫外域超高速分光システムの立ち上げ、走査ダイヤモンド NV 中心プローブの作製と高感度化、ナノ計測用光変調システムの開発などを中心に進めた。今年度の研究成果の概要について下記に示す。

筑波大・長谷(代表者)グループでは、NV センターが異なる密度で表面付近に導入されたダイヤモンド単結晶の時間分解反射率変化測定を行うことで、光カー効果や2光子吸収への NV センターの効果を評価した結果、特に3次の光カー効果が2次の非線形光学効果のカスケード過程により増強されることを見いだした。さらに、AFM の要素をポンププローブ型分光光学系に組み込むべく、光学系の設計・試作を行い、シリコンカンチレバーを用いた予備的実験を行った。

一方、筑波大・重川グループは、主に、1. プローブ顕微鏡制御系の整備、2. 光スポットトラッキング法の開発、3. ラマン評価システムの試作、4. TMDC 等の試料評価法の整備、について実験を進めた。1では、制御系を導入し、既存のプローブ顕微鏡と組み合わせた測定系を構築して動作を確認した。2では、光スポットを追尾し最適な測定位置への照射を可能にするシステムを構築した。3では、測定状態で試料を評価する光学系を試作した。4では、試料の一つに用いる予定である TMDC の表面構造やバンド構造を評価する方法を整備し、ダイナミクス測定に向けても時間分解 STM 評価の準備を進めた。

豊田工大・吉村グループは、探針増強ラマン分光用高感度探針の開発では、先端に Au-Ag ナノ

粒子が付着する探針を開発し、グラフェン試料を用いて、空間分解能が 15 nm であることを実証した。また、ナノ粒子を直接付着させる方法や、ウェットプロセスによる方法も検討した。一方、探針増強ラマン分光による NV センターのマッピングでは、電子ビーム励起プラズマを用いた窒素ドーピング法により作製した試料に対し、XPS や ESR を用いて NV センターを確認した。通常のラマン分光法では信号を得ることができず、今後増強探針を用いた測定を進める。

北陸先端大・安グループは、イオン注入装置 (30 keV) およびアニールによりバルクダイヤモンド結晶中に複数の NV 中心を作成し、このバルクダイヤモンド表面上にネオジウム磁性粒子を固定し、磁性粒子からの漏洩磁場の 3 次元磁気ベクトルイメージングが可能なことを示した。また、レーザーカッティングや電子線リソグラフィ、集束イオンビーム (FIB) 法による NV 中心を含有するダイヤモンドナノプローブの準備を行った。

#### 【代表的な原著論文】

1. M. Motojima, T. Suzuki, H. Shigekawa, Y. Kainuma, T. An, and M. Hase, “Giant nonlinear optical effects induced by nitrogen-vacancy centers in diamond crystals”, *Optics Express*, vol. 27, p. 32217 (2019).
2. T. Fukuda, K. Makino, Y. Saito, P. Fons, A. V. Kolobov, K. Ueno, and M. Hase, “Ultrafast dynamics of the low frequency shear phonon in  $1T'$ - $\text{MoTe}_2$ ”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 116, p.093103 (2020).
3. D. Prananto, D. Kikuchi, K. Hayashi, Y. Kainuma, and T. An, “Imaging of stray magnetic field vectors from a magnetic particle with an ensemble of nitrogen-vacancy centers in diamond”, *Jpn J. Appl. Phys.* vol. 58, SIIB20 (2019).

## § 2. 研究実施体制

### (1) 長谷グループ

- ① 研究代表者: 長谷 宗明 (筑波大学数理物質系 教授)
- ② 研究項目
  - ・紫外域超高速分光システムの開発
  - ・窒素ドープダイヤモンドの EO 効果の解析

### (2) 重川グループ

- ① 主たる共同研究者: 重川 秀実 (筑波大学数理物質系 教授)
- ② 研究項目
  - ・ナノ計測用光変調システムの開発
  - ・光走査システムの設計と制御プログラムの開発

### (3) 吉村グループ

- ① 主たる共同研究者: 吉村 雅満 (豊田工業大学大学院工学研究科 教授)
- ② 研究項目
  - ・探針増強ラマン分光用高感度探針の開発
  - ・探針増強ラマン分光による NV センターのマッピング

### (4) 安グループ

- ① 主たる共同研究者: 安 東秀 (北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 准教授)
- ② 研究項目
  - ・バルクダイヤモンドへの窒素イオン注入
  - ・走査ダイヤモンド NV 中心プローブの作製と高感度化