

Title	局所磁気イメージングのためのICPエッチングを用いた走査NV中心プローブの開発
Author(s)	王, 亦飛
Citation	
Issue Date	2025-06
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/19974
Rights	
Description	Supervisor: 安 東秀, 先端科学技術研究科, 博士

氏 名	Wang Yifei
学 位 の 種 類	博士（マテリアルサイエンス）
学 位 記 番 号	博材第 610 号
学 位 授 与 年 月 日	令和 7 年 6 月 24 日
論 文 題 目	Development of ICP-etched Scanning Nitrogen-Vacancy Center Probes for Local Magnetic Imaging
論 文 審 査 委 員	安 東 秀 北陸先端科学技術大学院大学 准教授
	赤堀 誠志 同 准教授
	大島 義文 同 教授
	高村 由起子 同 教授
	森下 弘樹 東北大学 准教授

論文の内容の要旨

In recent years, the nitrogen-vacancy (NV) centers in diamonds have been studied by a large number of researchers for their quantum properties. The spin states in the negatively charged NV can be excited by a laser to generate fluorescence and their magnetic resonances split by the external magnetic fields are detected via the optically detected magnetic resonance (ODMR). Therefore, the NV center can be used as a probe to measure stray magnetic fields from magnetic materials and to elucidate magnetic structures. Compared to other magnetometers, the NV center magnetometer is becoming increasingly used due to its high sensitivity and nanoscale spatial resolution.

In this research, the $^{14}\text{N}^+$ implanted diamond was fabricated via a focused ion beam (FIB) and attached to a quartz tuning fork as a scanning NV center probe with a diameter down to about 500 nanometers. Furthermore, to increase the performance of the fabricated probe, the inductively coupled plasma (ICP) etching was considered to be applied to the probe. We did the ICP etching on the probe for a few tens of nanometers, then measured the Rabi oscillation and spin coherence properties before and after the ICP etching process to evaluate the performance of the probe.

The fabricated scanning NV probe combined with an atomic force microscopy (AFM) was used to detect the stray fields from the magnetic samples, such as Bismuth Lutetium iron garnet (BLG) and Yttrium iron garnet (YIG). The magnetic structures (magnetic domains) from these magnetic samples can be monitored by the magneto-optic Kerr effect (MOKE) microscope and imaged by the fabricated NV-AFM system. Moreover, the bubble-shaped magnetic domains (bubble domains) from the magnetic samples were formed by applying external fields. This kind of domain from low-field magnetic samples could not be imaged by the fabricated probe clearly unless increasing the performance of the probe, for example, via the ICP etching process with around 25 nm.

In a word, this research focuses on the development of a high-performance scanning NV center probe in order that we can detect and image the stray field from the magnetic samples.

Keywords: NV center, scanning probes, focused ion beam, ICP etching, spin properties, magnetic samples, stray fields, magnetic domains

論文審査の結果の要旨

本論文は、高感度磁気検出・イメージング法として近年注目されている、ダイヤモンド中の窒素-空孔(NV)複合中心を走査プローブに応用するためのダイヤモンドピラー構造の作製と評価を行ったものである。

第1章では、NV 中心を用いた量子センシングと走査プローブ顕微鏡への応用に関する背景を紹介した。

第2章では、ダイヤモンド中の欠陥構造である、窒素-空孔複合中心(NV 中心)のスピン状態の基礎物性と NV 中心の磁気状態を光学的に検出する光学的磁気共鳴(ODMR)法の原理、この系に特有なスピン三重項状態の二準位間の電子遷移を制御するラビ振動、これを応用したスピンエコー法(横緩和 T_2)と縦緩和 (T_1)による NV 中心のスピン緩和時間計測の原理を解説した。

第3章では、ダイヤモンド NV 中心を含有するマイクロメートル以下のサイズのピラープローブ構造を集束イオンビーム法で作製し、さらに、ICP (誘導結合プラズマ) エッチング法により FIB 加工で生じたダイヤモンド結晶のダメージを除去、また、同時に ICP エッチングにより NV 中心のダイヤモンドピラー表面からの深さの調整 (40-10 ナノメートル) について、高性能なダイヤモンド NV 中心プローブを作製するための本研究の目的と方法について示した。

第4章では、FIB 加工によるダイヤモンドピラー作製と走査プローブへの取り付け、この走査 NV 中心プローブ顕微鏡による磁性薄膜の磁気ドメイン構造のイメージングの結果について詳述した。

第5章では、走査 NV 中心プローブの高性能化へ向けた数百ナノメートルの直径を有する NV 中心ピラープローブの作製とスピン特性の評価を行った。この際には、数十マイクロメートルサイズのダイヤモンド薄片チップ上に複数のダイヤモンドピラー構造を FIB により作製し、その後の ICP エッチングにより NV 中心のスピン特性のダメージと回復を調査し最適化を行った。この結果、先ず、FIB 加工により、良好なスピン特性を保持する約 600 ナノメートルの直径サイズのダイヤモンド NV 中心ピラープローブを作製可能なこと、さらに 25 ナノメートルの ICP エッチングによりピラープローブ表面からの NV 中心の距離を 40 ナノメートルから 15 ナノメートルの浅い位置に配置しても、十分な磁気感度を有する NV 中心を保持可能なことを実証した。

第6章では、本論文の結果、考察、今後の展望についてのまとめを詳述した。

以上、本論文は、ダイヤモンド中の NV 中心を含有するピラープローブ構造の作製とそのスピン特性の評価、最適化を行ったことに意義があり、今後の走査 NV 中心プローブの応用とナノ磁気イメージングの実現に向けた成果を得た点に大きな意義があり、学術的に貢献するところが大きい。よって博士 (マテリアルサイエンス) の学位論文として十分価値あるものと認めた。