

ダイヤモンドによる単一プロトン核スピン磁気共鳴センシング

研究代表者

伊藤公平 慶應義塾大学理工学部物理情報工学科

共同研究者

渡邊幸志、鹿田真一 産業技術総合研究所



1. 研究の背景と達成目標

単一分子の核磁気共鳴(NMR)測定を室温でルーチン的に実現する装置の開発を最終目標として、本研究では単一水素原子(プロトン)核スピンのNMR測定を目指す。ダイヤモンド基板の表面から数nmの深さに、空孔(一個の炭素原子が抜けた結果としてできる孔)と窒素原子が一個ずつでペアを組む特殊な欠陥を埋め込む。この「NV中心」と呼ばれる特殊な欠陥は、室温においても単一の電子スピン(磁石)を捕獲し、その向きによって発光の有り無しが変化する。よって、室温において発光するか否かを測定すれば、そこにあるわずか一個の電子スピン(磁石)の向きがわかる。これは究極のナノコンパスであり、超高感度磁気センサである。よってNV中心の直上のダイヤモンド表面に水素原子を置けば、単一プロトン原子核スピンによって生じる磁場(磁力線の向き)が電子ナノコンパスで測定できる。この状況を確立したうえで、プロトン核磁気共鳴に必要な外部磁場印加と共鳴電磁波(マイクロ波)照射を行い、プロトン核スピン(これもナノコンパス)の向きを自在に変化させる。その向きをNV中心の電子スピンの測定することで、単一プロトン核スピンのNMRが達成される。将来的にはこの技術を発展させ、ダイヤモンド上にのせた単一分子の核磁気共鳴(NMR)の実現を目指す。

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- ・ ダイヤモンド同位体工学という新しい概念をダイヤモンドの結晶成長分野に導入し、 ^{12}C という一種類の同位体を濃縮したダイヤモンドを成長することで、その中に形成されるNV中心のセンサとしての性能を向上させることに成功した。(Nano Letters誌に論文1報を発表)
- ・ 2013年発表当時、室温における世界最少個数(約6千個)のプロトン核磁場の検知に、ダイヤモンドNV中心をセンサに用いて検知することに成功した。(上述と同じNano Letters誌内で報告)
- ・ ダイヤモンド表面付近に配置された単一のNV中心を用いて、ダイヤモンド表面に二次元的に存在する電子スピンの量子力学的な揺らぎ(quantum fluctuation)の測定に成功し、その周波数解析を実施した。このノイズを除去することが、今後、ダイヤモンド表面上に測定対象物をのせたときに大切になる。よってこの揺らぎ(ノイズ)解析は量子物理学という学術的な重要性に加えて、応用上も大切である。(Physical Review Letters誌に論文を2報発表)
- ・ ダイヤモンド表面付近にNV中心を2次的に配置したアレイ(格子)を用意し、それぞれのNV中心を量子センサ(ピクセル)とした高位置分解能のデスクトップ磁場分布装置の開発に成功し、デモンストレーションとしてフロッピーディスク中の磁区分布の室温イメージングに成功した。
- ・ 単一プロトン測定に必要な装置系の開発を進めた。
- ・ 以上の成果が認められ、2014年度より日本学術振興会・科学研究費補助金・基盤研究(S)「ダイヤモンド量子センシング」に研究代表者:伊藤公平、研究分担者:渡邊幸志、鹿田真一に、もう一名、原田慶恵(京大)を加えたチーム構成で採択された。

3. 研究成果

「発表実績」の欄に示すとおり、物理学およびナノテクノロジーの分野で極めてインパクトが強い学術誌に本助成研究の成果を発表した。また、右図に示すとおり、デスクトップ型のダイヤモンドナノNMRおよびイメージング装置の開発にも成功し、展示会等で発表を行った。



4. 今後の展開

本助成により開花した研究が、2014年度より科研費基盤研究(S)「ダイヤモンド量子センシング」として採択され、量子物理学に関する基礎研究とセンシング技術開発に関する応用研究を両輪としたプロジェクトを5年計画で推進することにつながった。また国際会議等も主催してダイヤモンド量子センシング研究の発展を促す。

発表実績

1. Y. Romach, C. Müller, T. Unden, L. J. Rogers, T. Isoda, K. M. Itoh, M. Markham, A. Stacey, J. Meijer, S. Pezzagna, B. Naydenov, L. P. McGuinness, N. Bar-Gill, and F. Jelezko, "Spectroscopy of Surface-Induced Noise Using Shallow Spins in Diamond," *Phys. Rev. Lett.* Vol. 114, 017601 (2015).
2. K. M. Itoh, "Quantum-assisted sensing using nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond," *AAPPS Bulletin*, Vol. 25, 12 (2015).
3. K. M. Itoh and H. Watanabe, "Isotope engineering of silicon and diamond for quantum computing and sensing applications," *MRS Commun.*, Vol. 4, 143-157 (2014).
4. T. Rosskopf, A. Dussaux, K. Ohashi, M. Loretz, R. Schirhagl, H. Watanabe, S. Shikata, K. M. Itoh, and C. L. Degen, "Investigation of Surface Magnetic Noise by Shallow Spins in Diamond," *Phys. Rev. Lett.* Vol. 112, 147602 (2014).
5. K. Ohashi, T. Rosskopf, H. Watanabe, M. Loretz, Y. Tao, R. Hauert, S. Tomizawa, T. Ishikawa, J. Ishi-Hayase, S. Shikata, C. L. Degen, and K. M. Itoh, "Negatively Charged Nitrogen-Vacancy Centers in a 5 nm Thin ^{12}C Diamond Films," *Nano Lett.* Vol. 13, 4733 (2013).
6. H. Watanabe, T. Koretsune, S. Nakashima, S. Saito and S. Shikata, "Isotope composition dependence of the band-gap energy in diamond", *Phys. Rev. B*, Vol. 88, 205420 (2013).
7. (招待講演) 伊藤公平, 早瀬潤子, 渡邊幸志, 鹿田真一「ダイヤモンド NV センターを用いたナノスケール NMR」, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014 年 9 月 17-20 日
8. (招待講演) K. M. Itoh, "Semiconductor Isotope Engineering for EPR Quantum Information Processing," 5th Rocky Mountain Conference on Magnetic Resonance, July 13-17, 2014, Colorado, USA.
9. (招待講演) K. M. Itoh, K. Ohashi, T. Rosskopf, A. Dussaux, M. Loretz, Y. Tao, R. Schirhagl, H. Watanabe, J. Ishi-Hayase, T. Ishikawa, S. Shikata, and C. L. Degen, "Quantum Sensing Using Negatively Charged Nitrogen-Vacancy Centers in a 5nm-Thin, Isotopically Enriched ^{12}C Diamond CVD Layer," 43rd "Jaszowiec" International School and Conference on the Physics of Semiconductors, June 7-12, 2014, Wista, Poland.
10. (招待講演) K. M. Itoh, "Semiconductor Isotope Engineering of Silicon and Diamond for Quantum Computation and Sensing," The 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials, September 24-27, 2013, Fukuoka, Japan.