## イオン飛跡に沿って形成される № センターのスピン特性

Spin Property of NV Centers Created along the Ion Track 量研機構<sup>1</sup>, 群馬大<sup>2</sup>, 物材機構<sup>3</sup>, 筑波大<sup>4</sup>, 早大<sup>5</sup> <sup>o</sup>小野田 忍<sup>1</sup>, (M1)立見 和雅<sup>2</sup>, (D1)春山 盛善<sup>1, 2</sup>, 寺地 徳之<sup>3</sup>, 磯谷 順一<sup>4</sup>, (M1)山野 颯<sup>5</sup>, 川原田 洋<sup>5</sup>, 加田 渉<sup>2</sup>, 花泉 修<sup>2</sup>, 大島 武<sup>1</sup> QST<sup>1</sup>, Gunma Univ.<sup>2</sup>, NIMS<sup>3</sup>, Univ. of Tsukuba<sup>4</sup>, Waseda Univ.<sup>5</sup> °S. Onoda<sup>1</sup>, K. Tatsumi<sup>2</sup>, M. Haruyama<sup>1,2</sup>, T. Teraji<sup>3</sup>, J. Isoya<sup>4</sup>, H. Yamano<sup>5</sup>, H. Kawarada<sup>5</sup>, W. Kada<sup>2</sup>, O. Hanaizumi<sup>2</sup>, T. Ohshima<sup>3</sup> E-mail: onoda.shinobu@qst.go.jp

【研究背景】NV<sup>-</sup>(Nitrogen Vacancy)センターの優れたスピン特性を利用して、ナノスケールセンシングや量子通信・コンピューティングを目指した研究が盛んに行われている。その中でも我々は、数ビットの量子レジスタを目指した研究を行っている。その実現には、NV<sup>-</sup>センターを数~十数 nm の間隔で複数個配置すると同時に、個々のコヒーレンス時間(T<sub>2</sub>)を可能な限り長くすることが求められている。前者に関しては、ナノホールマスクを介してイオンを注入し、~12 nm の範囲に数個の NV<sup>-</sup>センターを形成することに成功している[1]。一方、他グループから、集束イオンビーム(FIB)と窒素ガスイオン源を組み合わせて利用し、マスクレスに NV<sup>-</sup>センターを配列させる試みが報告された[2]。しかし、これらの手法は克服すべき技術的課題も多く残されている。例えば、高位置精度に窒素をダイヤモンド中に送り込むためには、数 keV といった低エネルギー窒素イオンを注入せざるを得ず、表面近傍に NV<sup>-</sup>センターが形成されることになる。NV<sup>-</sup>センターの T<sub>2</sub>は表面状態に強く依存することから、量子ゲート操作を実現できるほどの長い T<sub>2</sub>を得ることは現状では困難である。

本研究では、長い T<sub>2</sub>を持つ NV<sup>-</sup>センターを配列状に配置するために、直進性の優れた高エネル ギーイオン照射が利用できないかを検討した。数百 MeV の高エネルギー重イオンは、ダイヤモン ド中で数十 µm も直線的に侵入して停止する。イオンの飛跡に沿って高密度の原子空孔が導入さ れることになり、その原子空孔とダイヤモンド中の不純物窒素を熱処理により結合させることで 飛跡に沿って NV<sup>-</sup>センターを形成できる[3]。加えて、イオン飛跡は表面の影響を受けない深さに 形成される。本手法では、長い T<sub>2</sub>を持つ NV<sup>-</sup>センターが自律的に直線状に形成されることから、 高度なビーム照射技術を用いる必要がない利点がある。本報告では、イオン飛跡を構成する NV<sup>-</sup> センターのスピン特性を評価した結果を述べる。

【実験及び結果】試料には <sup>13</sup>C の影響を除去した <sup>12</sup>C 濃縮 CVD (99.998%) 合成ダイヤモンドを用いた。 試料に対して約 10°の角度で Os-490MeV イオンを 照射した。イオン照射後、800~1200°Cの範囲で熱処 理を施し、共焦点レーザー走査型蛍光顕微鏡 (CFM) を用いて観察した。図 1 は、イオン飛跡(直線状に形 成された NV<sup>-</sup>センター)の CFM 像(XY スキャン) である。熱処理は、1000°C・10 時間である。図中に 示す各位置における NV<sup>-</sup>センターの T<sub>2</sub>をスピンエコ ー法にて評価した。

図1中の Pos. A の蛍光スポットにおいては、4 つの NV<sup>-</sup>センターが含まれていることが光検出磁気共鳴 (ODMR)測定によって明らかとなった。Pos. B およ びCにおいては、1 つおよび2 つの NV<sup>-</sup>センターで あることが分かった。それぞれのT<sub>2</sub>を測定した結果、 3 つの NV<sup>-</sup>センターの全てで約0.5ms という長いT<sub>2</sub> が得られた。図2は Pos. B の NV<sup>-</sup>センターのスピン エコー測定結果である。一方、1200°C・10分間の熱 処理の場合、1ms を超えるT<sub>2</sub>を得た。

【参考文献】



Fig. 1 Confocal XY image (15 x 5  $\mu$ m) of an ion track containing dense NV<sup>-</sup> centers after 1000°C 10 hours annealing.



Fig. 2 Spin echo measurement data of single  $NV^-$  center at Pos. B. The squares represent the measured data, and solid line shows the fitting data. The coherence time is estimated to be 0.5ms.

[1]東又格 他, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 15p-4F-22, 2015 年. [2]M. Lesik, et al., arXiv:1304.6619, 2013. [3]春山盛善 他, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 19p-H103-2, 2016 年. 【謝辞】本研究は科研費 26420877、26246001、26220903 により実施されました。共焦点レーザー 走査型蛍光顕微鏡のパルス ODMR 計測の構築には Ulm 大学の Liam P. McGuinness 博士および Fedor Jelezko 教授に多大なるご協力頂きました。