

ダイヤモンド NV 中心の高転換効率化への取り組みの現状

Current Status of Efforts for High Conversion Efficiency of NV Center in Diamond

量研高崎研 °小野田 忍

QST Takasaki, °Shinobu Onoda

E-mail: onoda.shinobu@qst.go.jp

室温動作の固体量子センサとして有望なスピン欠陥であるダイヤモンド中の NV 中心を形成する方法は、結晶合成法と照射法に大別できる。前者では、ダイヤモンド単結晶の合成中に導入される P1 中心（炭素を置換した格子位置の孤立した不純物窒素で N_s^0 と表記される）の一部が NV 中心となる。単結晶の合成には、CVD と高温高压（HPHT）が代表的な手法として知られている。一方、後者の照射法は、粒子線を用いてダイヤモンド中に NV 中心を形成する手法である。照射法は、出発材料としてダイヤモンドを準備し、電子線やイオン等の粒子線を照射若しくは注入する。その後、熱処理を行うと、格子間原子や原子空孔の再配置が起こり、結晶性が回復するとともに NV 中心が形成される。

ダイヤモンド中の NV 中心には 3 つの電荷状態 NV^- 、 NV^0 、及び NV^+ が存在する。NV 中心の総濃度 $[NV^T]$ は、 $[NV^T] = [NV^-] + [NV^0] + [NV^+]$ と表すことができる。一般的に NV^+ 濃度は無視できるほど小さく、 NV^0 と NV^- がダイヤモンド中に共存する。3 つの電荷状態の NV 中心の内、スピン $S=1$ である NV^- が量子センサとして広く利用されている。ダイヤモンド結晶中の全ての窒素原子 (N^T) の内、 NV^- 濃度の割合を転換効率 (E_{conv}) と呼び、 $E_{conv} = [NV^-]/[N^T]$ と表す。ここで、 $[N^T] = [N_s^0] + [N_s^+] + [NV^-] + [NV^0] + [NV^+] + [N^{other}]$ である。孤立した格子位置の不純物窒素は 2 つの電荷状態 N_s^0 (P1 中心のこと) 及び N_s^+ (P1 中心から電子が失われた状態) を持つ。ここでは、 N_s と NV 以外の窒素関連欠陥を N^{other} と表している。 N^{other} には、CVD 結晶中に存在することで知られる水素関連欠陥である NVH 等が含まれる。転換効率を高めることは、即ち、NV 中心の総濃度を高めることに等しい。

CVD 合成によって窒素濃度が高い結晶を合成すると $([N_s^+] + [N_s^0]) : [NVH] : [NV^-]$ の比率が凡そ 300:30:1 になると Edmonds らが報告している[1]。勿論、比率は結晶合成条件によって影響されるが、Edmonds らの場合、ダイヤモンド合成中の転換効率はわずか 0.3% 程度であるという結果であった。このように結晶合成法では転換効率が低いことが課題であり、転換効率を高める取り組みが進められている。

一方、結晶合成法に対して照射法では、不純物窒素を NV 中心に変えるため、転換効率を向上させることが可能である。我々は、結晶合成法と照射法を組み合わせることで高い転換効率を目指している。電子線や陽子線照射によって転換効率を数%に増加させたといった報告がある[2-6]。これに対して我々は、転換効率が 10%を超える NV 中心形成に成功しており、2 MeV 電子線照射によって 16~45%の転換効率を報告してきた[7-12]。本発表では、高い転換効率へ向けた取り組み及び今後の課題に触れる。

謝辞：本研究の一部は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）JPMXS0118067395 の助成を受けたものです。

参考文献：

- [1] A. M. Edmonds et al., Phys. Rev. B, 86, 035201 (2012), [2] J. Botsoa et al., Phys. Rev. B, 84, 125209 (2011), [3] V. M. Acosta et al., Phys. Rev. B, 80, 115202 (2009), [4] J. F. Barry et al., Proc. Natl. Acad. Sci., 113, 49, 14133 (2016), [5] E. Fraczek et al., Opt. Mater. Express, 7, 7, 2571 (2017), [6] A. T. Collins: New Diamond and Frontier Carbon Technology, 17 (2007), [7] T. Wolf et al., Phys. Rev. X, 5, 041001 (2015), [8] C. Grezes et al., Phys. Rev. A, 92, 020301(R) (2015), [9] S. Choi et al., Nature, 543, 221 (2017), [10] A. Angerer et al., Nat. Phys., 14, 1168 (2018), [11] F. M. Stürner et al., Diam. Relat. Mater., 93, 59 (2019), [12] H. Zheng et al., Phys. Rev. Applied, 11, 064068 (2019).