ダイヤモンド：量子技術のためのスピン操作とマテリアルの発展 Diamond: spin manipulation and material developments for quantum technology

筑波大 磯谷順一

Univ. of Tsukuba Junichi Isoya

E-mail: isoya.junichi.fw@u.tsukuba.ac.jp

点欠陥は結晶格子中に捕獲された分子と言える。ダイヤモンド中の NV(窒素-空孔)センターは、長いコヒーレンス時間、光による初期化と読み出しという極低温の捕獲イオンの特性を室温で実現できる上に、固体スピン量子ビットとしてチップスケールの集積化の可能性をもつ。

光子を用いてリンクした量子ネットワークは量子コンピュータの拡張方式にもなるので、ノードとなる少数ビットの量子レジスタの開発が重要である。スピン-光子インターフェイスには低温が必要であり、光特性の点で SiV、GeV、SnV などのカラーセンターも注目されている。ここでは、NV センターを用いる室温動作の量子レジスタの作製と応用、および、量子センシングからの話題を紹介する。

スピン量子レジスタは個々にアクセス可能なスピンの間のコヒーレント結合が必要である。双極子双極子相互作用で結合した NV センターの配列は多量子ビット化の方式のひとつであり、長いコヒーレンス時間と短い距離を両立する作製法が課題である。ナノホール・マスクを用いるイオン注入では 2 量子ビットを超えることは難しい。窒素原子を複数含む分子イオン注入により NV センター・ペア(距離 13 nm, $T_2=0.63, 0.65$ ms)およびトリプル(距離 9, 12, 20 nm, $T_2=0.28, 0.09, 0.29$ ms) の作製に成功している[1,2]。ここでは NV 軸方向の違いによる ODMR 周波数の違いにより個々のスピンを識別している。

^{12}C 濃縮 CVD 結晶に電子線照射で作製した単一 NV センターの電子スピン ($T_2\sim 0.18$ ms) と核スピン 3 個 (^{14}N , $2\times^{13}\text{C}$, $T_2\sim 7$ ms) からなるハイブリッド量子レジスタを用いて室温で量子エラー訂正を実証した[3]。NV-NMR において個々の核スピンの位置を決める 1 分子の 3D-MRI をめざす周波数分解能を得る挑戦は、まずダイヤモンド内部の ^{13}C 核スピンに対して原理実証が行われるので核スピンを用いる量子レジスタの多量子ビット化に通じる[4,5]。低温($\sim 4\text{K}$, $T_1>1$ h)での多量子ビット化では Delft 工科大学の論文が注目される[6]。

^{12}C 濃縮 HPHT 結晶にイオン注入で作製した浅い単一 NV センターでは、センサー電子スピン ($T_2\sim 0.3$ ms) と窒素核スピン ($T_2\sim 9$ ms, $T_1=260$ s) のハイブリッド量子レジスタにエンタングルメント、量子非破壊測定など QIP プロトコルを用い、 $\sim (28\text{ nm})^3$ の検出体積、3 T の高磁場でケミカルシフトを検出する室温液体試料の高分解能ナノ NMR を実現している[7]。

単一欠陥検出は励起・蛍光放出を高速に繰り返し多数の光子を集められることによるが、ダイヤモンドの屈折率が高いために捕集効率が低い。2 光子過程による NV と NV⁰ の 2 つの電荷状態のサイクリングに伴う電子・正孔を電極に集める光電流検出を用いて、単一 NV センターの検出・マッピング・ODMR・ラビ振動の読み出しに成功した[8]。量子レジスタのオンチップ集積化に役立つと考えられる。

本研究は多数のグループ、量研(小野田忍、大島武)、NIMS(寺地徳之)、早稲田大学(谷井孝至、川原田洋)、群馬大学(加田渉、花泉修)、住友電工(角谷均)、シュツットガルト大学(Jörg Wrachtrup)、ウルム大学(Fedor Jelezko)、IMEC(Milos Nesladek)との共同研究の成果である。JST-DFG、科研費(17H02751, 26246001, 26220903)、JST-CREST(JPMJCR1773)の助成に感謝します。

- [1] T. Yamamoto *et al*, Phys. Rev. B. **88**, 201201 (R) (2013), [2] M. Haruyama *et al*, Nat. Commun.**10**, 132019 (2019), [3] G. Wardherr *et al*, Nature **506**, 204(2014), [4] M. Pfender *et al*, Nat. Commun., **8**, 834 (2017), [5] M. Pfender *et al*, Nat. Commun.**10**, 594 (2019), [6] M. H. Abobeih *et al*, Nat. Commun. **9**, 2552 (2018), [7] N. Aslam *et al*, Science, **357**, 67 (2017), [8] P. Siyushev *et al*, Science **363**, 728 (2019).