ダイヤモンド中の単一 NV センターを用いた量子ヘテロダイン測定における雑音因子に関する理論的考察

Possible noise factors in quantum heterodyne measurements with NV centers in diamond: A simulation study

早大理工 °上田 優樹，齋藤 悠太，大谷 和毅，津川 雅人，早坂 京祐
金久 京太郎，上田 真由，川原田 洋，谷井 孝至

Waseda Univ. °Y. Ueda, Y. Saito, K. Otani, M. Tsugawa, K. Hayasaka, K. Kanehisa, M. Ueda, H. Kawarada, T. Tanii E-mail: ueda@tanii.nano.waseda.ac.jp

【研究背景と目的】ダイヤモンド中の浅い単一 NV センターの電子スピンは表面上の標的分子の核スピン検出（ナノ NMR）のための磁気プローブとして用いられる。中でも量子ヘテロダイン法（以下、Qdyne 法）は、外部クロックの活用により、実効的にコヒーレンス時間 T_2 の制限を超える計測に相当するため、ダイナミックデカップリングによる交流磁場計測（例えば、CPMG や XY8-k）に比べて高い周波数分解能を達成できる[1, 2]。しかしながら実際の計測系では、①サンプルステージ位置の時間安定性、②レーザ強度の時間安定性、および、③静磁場の時間安定性を長時間にわたって維持することが逆に難しくなる。そこで、本発表では、上記①から③の時間不安定要素を考慮した場合に、Qdyne 法が与える NMR シグナルをシミュレーションにより再現することで、これらの時間不安定性が NMR シグナルに与える影響を考察する。

【シミュレーション方法】Qdyne 法により、電子スピンの位相に依存したシグナルを読み出すのに XY8-k (k=1～4)を用いることとし、1 回の XY8 シーケンスで取り出される位相シグナルは、レーザ照射後から 300 ns の間に検出したフォトン数で読み出されるものとした。上の要因①と②は、検出フォトン数がステージ位置やレーザ強度に依存して揺らぐものとすることで、また、要因③は ^{1}H 核スピンのラーモア周波数が時間によって揺らぐものとしてシミュレーションに取り込む。電子スピンの位相は、XY8-k により、ダイヤモンド表面に滴下されたイマージョンオイルを想定し、検出体積内の ^{1}H 核スピンと相互作用させた浅い NV センター（深さ～2 nm）の電子スピンの時間発展により計算し、Qdyne 法の疑似的なシグナルを再現した。

【シミュレーション結果】シミュレーション結果の例として、電子スピン状態 Ms=0 に対する Ms=±1 の ODMR コントラストを 72%として、Qdyne 法の疑似的なシグナルの FFT スペクトルを Fig. 1 に示す。ここでは、②の解析結果として、レーザ強度が時間経過にともなって減衰している場合とそうでない場合（挿入図参照）の差を示している。発表では、このように測定環境が揺らいだ場合の定量的な解析結果を発表する予定である。

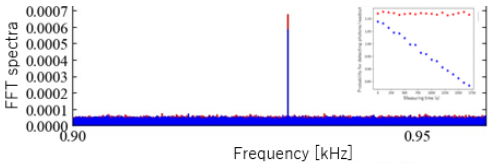

Fig.1 FFT spectrum of proton nuclear spin obtained by Qdyne measurements. The laser intensity is assumed to be constant (red) or decrease (blue) with time as shown in the inset.

なお、本研究は文科省科研費（18K19026）の助成を受けた。

[1] T. Staudacher: *Science* **339** (2013) 561. [2] S. Schmitt: Science **356** (2017) 832.