

NV 中心の量子実験

1 はじめに

NV 中心とは、ダイヤモンドの隣同士の炭素原子がそれぞれ窒素原子 (N) と空孔 (V) に置き換わった構造のことです。この NV 中心を用いて量子力学的な現象を測定しました。

2 スピンについて

電子や陽子、中性子はスピンという量子力学的な量を持っています。このスピンという量が磁場と相互作用することによって持つエネルギーは、スピンの状態ごとに決まった飛び飛びの値を取ることが知られています。NV 中心の電子のスピン状態は 3 種類あり、各状態間のエネルギー差に対応する周波数の電磁波を NV 中心に照射することでスピン状態を変えることが出来ます。今後この 3 種類のスピン状態を $m_s = 0, \pm 1$ という数で区別し、この順番でエネルギーが上がっていくとします。

3 磁気共鳴周波数の測定

3.1 磁気共鳴周波数とは

磁気共鳴周波数とはスピン状態間のエネルギー差に対応する電磁波の周波数のことです。

3.2 測定原理

NV 中心に緑色のレーザーを照射すると赤色の光が帰ってきます。これは、緑色のレーザーによって励起された NV 中心が基底状態に戻る時にエネルギー差分の光が放出されるためです。赤色の光を放出した後のスピン状態は、初めのスピン状態が何であっ

たかに関わらず、 $m_s = 0$ の基底状態に変化するという性質があります。また、この赤色の光は初めのスピン状態が $m_s = 0$ のときは強く、 $m_s = \pm 1$ のときは弱いという性質があります。この 2 つの性質を利用して磁気共鳴周波数を測定する連続波光検出磁気共鳴 (CW ODMR) という方法の測定手順を以下に示します。

3.3 CW ODMR

CW ODMR は NV 中心に緑色のレーザーを常に照射し続けるという状況のもとで、以下に示す手順を繰り返す方法です。

1. 緑色のレーザーのために、1 つ目の性質によってスピン状態が 0 に初期化される。
2. ある周波数の電磁波を照射。照射した電磁波の周波数が $m_s = 0 \rightarrow -1$ または $m_s = 0 \rightarrow +1$ の変化に対応する場合、スピン状態が変化する。
3. 発光強度を測定。スピン状態が変化していた場合に限り 2 つ目の性質のために赤色の光の強度が下がる。

これを 1 サイクルとして、2 で照射する周波数を少しずつ変えることで磁気共鳴周波数を測定することが出来ます。

3.4 測定結果

図 1 は CW ODMR の $m_s = -1$ の磁気共鳴周波数付近の測定結果です。縦軸は発光強度で、マイクロ波を照射していない時の値で規格化されています。このグラフを見ると、

2428 MHz 付近で観測される光が弱くなっていることがわかります。これが $m_s = 0 \rightarrow -1$ に対応する磁気共鳴周波数です。

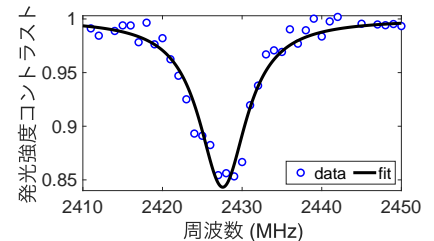


図 1: CW ODMR の結果

4 ラビ振動の測定

4.1 ラビ振動とは

$m_s = 0 \rightarrow -1$ または $m_s = 0 \rightarrow +1$ の変化に対応する磁気共鳴周波数と等しい周波数で回転する磁場を NV 中心にかけることによって、NV 中心のとり得るスピン状態を 0 と -1 、もしくは 0 と $+1$ のどちらかに制限することが出来ます。この 2 つの状態のうちどちらが観測されるかは、確率によって決まることが知られています。この確率が回転磁場を加えるために振動する現象がラビ振動と呼ばれるものです。

4.2 測定方法

1. 緑色のレーザーを照射し、1 つ目の性質によってスピン状態を 0 に初期化。
2. CW ODMR で測定した磁気共鳴周波数で回転する磁場を一定時間かける。この間に確率が振動する。
3. 再び緑色のレーザーを照射し、発光強度を測定。

この手順を何度も繰り返すことによって、磁場をかける時間の長さに対する確率を測定することが出来ます。

4.3 測定結果

図 2 はラビ振動の測定結果です。 $m_s = 0$ の確率が時間とともに振動しているのがわかります。この確率振動の周波数は 15.65 MHz と見積もられます。

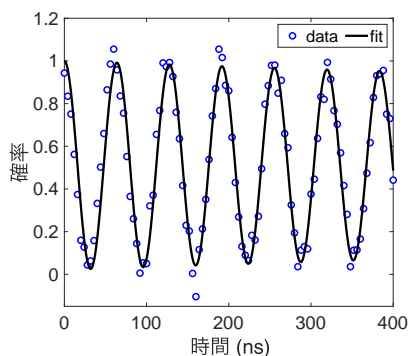


図 2: ラビ振動の様子

5 超微細相互作用の測定

5.1 超微細相互作用とは

NV 中心の窒素原子の原子核も実はスピンを持っています。このスピンは核スピンと呼ばれていて、電子スピンと同様に核スピンの状態も 3 種類あり、 $m_I = 0, \pm 1$ という数で区別されます。この窒素原子の核スピンと NV 中心の電子のスピンとの相互作用によって、電子スピンのエネルギーが (m_s, m_I) の組み合わせによって異なる値を取るようになります。これが超微細相互作用と呼ばれるものです。この作用によって、 $m_s = 0 \rightarrow -1$ 、 $m_s = 0 \rightarrow +1$ の変化に対応する磁気共鳴周波数が m_I の違いによってそれぞれ 3 種類に分かれることがわかります。

5.2 測定原理

ラビ振動を測定することで、確率振動の周期を求められました。このラビ振動周期の半分の時間だけとなる回転磁場を NV 中心にかけると、スピンの状態が $m_s = -1$ に偏った状態にすることが出来ます。この決まった長さの回転磁場のことを、 π パルスと言います。 π パルスをかけることで、スピン状態を $m_s = -1$ に偏らせることでコントラストを最大にすることが出来ます。また、ラビ振動の周波数 f_R と加える回転磁場の強さ B には

$$f_R = \sqrt{2}\gamma_e B$$

という関係があります。ここで γ_e は磁気回転比と呼ばれる量です。この関係のために、回転磁場を弱めると確率振動を遅くする、つまり π パルスの長さを長くすることが出来ます。また、量子系は繊細なため温度や不純物によって時間と共に量子状態が乱れてしまいます。この量子状態の乱れが目立つようになるまでの時間程度に π パルスの長さを伸ばしていくと磁気共鳴周波数の感度が良くなっていくことが知られています。この性質を利用した磁気共鳴周波数の測定方法はパルス ODMR (p ODMR) と呼ばれ、超微細相互作用を測定することが出来ます。

5.3 p ODMR

1. 緑色のレーザーを照射し、スピン状態を 0 に初期化。
2. π パルスをかける。
3. 再び緑色のレーザーを照射し、発光強度を測定。それと共に初期化も行う。

CW ODMR と同じようにこれを 1 サイクルとして、2 で照射する π パルスの周波数を少しずつ変えることで磁気共鳴周波数を測定することが出来ます。

5.4 測定結果

図 3 は p ODMR の $m_s = -1$ の磁気共鳴周波数付近の測定結果です。縦軸は ODMR のときと同じように規格化されています。グラフを見ると、2424 MHz、2427 MHz、2429 MHz でそれぞれ発光強度が下がっていることがわかります。このように CW ODMR では見えなかった構造を見ることが出来ます。

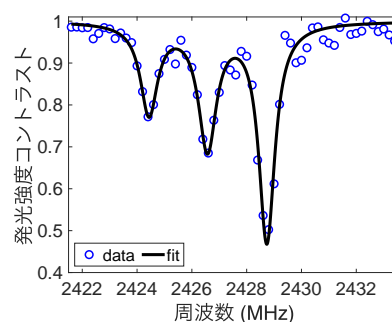


図 3: p ODMR の結果

6 謝辞

本実験は小林研究室の皆様のご協力のもとに行われました。特に顧豪さんには実験準備からデータ処理に至るまでの実験全体にわたるご指導を賜りました。ご協力くださった全ての皆様に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] A. Dréau, M. Lesik, L. Rondin, P. Spinicelli, O. Arcizet, J.-F. Roch and V. Jacques. “Avoiding power broadening in optically detected magnetic resonance of single nv defects for enhanced dc magnetic field sensitivity” Phys. Rev. B **84**. (2011) : 195204.
- [2] 佐々木健人. “ダイヤモンド中空窒素空孔中心のセンサー応用と物性計測” 物性研究・電子版 **10.1** (2022).