

研究報告書

「固体中の電子スピンを用いた光-マイクロ波のコヒーレント相互変換」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2015年12月～2019年3月

研究者: 久保 結丸

1. 研究のねらい

量子情報通信へ向けて、光とマイクロ波というエネルギースケールが5桁異なる電磁波同士をコヒーレントに繋ぎ、情報伝達の低エネルギー化・高効率化の限界に挑む。情報の最小単位である単一光子と単一量子マイクロ波(マイクロ波光子)を効率100%で変換する量子トランスデューサーを実現し、量子情報通信に必要な基盤技術を確立することを目指す。

Google, Intel, IBM, Microsoft といった主要なIT企業がここ数年の間に量子コンピュータ開発への支援を立て続けに開始しており、量子コンピュータは次世代社会の基幹技術として非常に注目を集めている。その一方で、量子コンピュータをネットワーク化する原理や方法は依然として確立されておらず、量子情報科学における最重要課題の一つと位置づけられている。本研究では固体中のスピンを用いて量子トランスデューサーを実現することを目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

3次元で常伝導体(銅)のループギャップ共振器を量子トランスデューサー用に設計し、評価した。図1aが試作したループギャップ共振器である。この共振器の試料空間に不純物スピンを含んだダイヤモンド結晶を固定し、共振器を希釈冷凍機内に置いて温度約10 mKの極低温において電子スピン共鳴(ESR)を測定した。本研究で用いたのは窒素-空孔(NV)中心及び置換窒素(P1)中心(図1b)である。

図1cに得られた結果の一例を示す。各磁場において得られた共振器のマイクロ波透過スペクトラムを色プロットしたものである。NV中心のESR周波数が共振器の周波数と一致する磁場(赤矢印)付近において示すレベル反交差が観測された。これは、共振器中のマイクロ波光子とNV中心のスピン集団(スピン数 $\sim 10^{15}$)とが強結合していることの直接的な観測である [Ball et al., Appl. Phys. Lett., 112 204102 (2018)]。この結果から、本研究で設計したループギャップ共振器は量子トランスデューサーに適していることが示された。

研究者は現在、ダイヤモンド中のシリコン-空孔中心(SiV中心)を上述のループギャップ共振器を用いて極低温ESR測定をしている。また、光共振器の室温での動作確認を終え、低温用の設計に着手している。

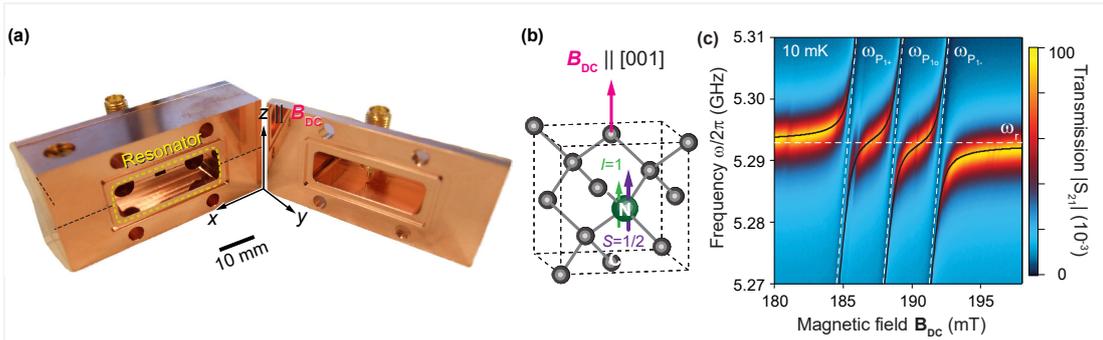


図 1 ループギャップマイクロ波共振器 (a): 試作, 実装した共振器の写真. (b): ダイヤモンド P1 中心. 結晶内の炭素の位置に窒素が置換された構造を持つ. (c): 観測された透過スペクトラムの2次元プロット. P1 中心の3本の電子スピン共鳴周波数 $[\omega_{P1,j} (j = +, 0, -)]$, 白破線が共振器周波数 (ω_r , 白破線) と交わる磁場で, 強結合を示すレベル反交差が観測された. 実線は結合系の新たな固有エネルギーである.

(2) 詳細

研究テーマ A 「量子トランスデューサーに向けたマイクロ波共振器の設計と評価」

光との相性やマイクロ波と光の空間的モード整合の事情を考慮に入れ, スピン-超伝導ハイブリッド量子系の研究で頻りに用いられていた2次元の超伝導共振器ではなく, 3次元で常伝導体(銅)のループギャップ共振器を上述の量子トランスデューサー開発用に設計し, 評価した. 図 1a が試作したループギャップ共振器である. 試料空間及び両端のループがインダクタンス(L), 両隣のギャップがキャパシタンス(C)の役目を果たす 3次元の集中定数型 LC 共振器である. この共振器の試料空間に不純物スピンを含んだダイヤモンド結晶を固定し, 共振器を希釈冷凍機内に置いて温度約 10 mK の極低温において電子スピン共鳴(ESR)を測定した. 本研究で用いたのは窒素-空孔(NV)中心及び置換窒素(P1)中心である.

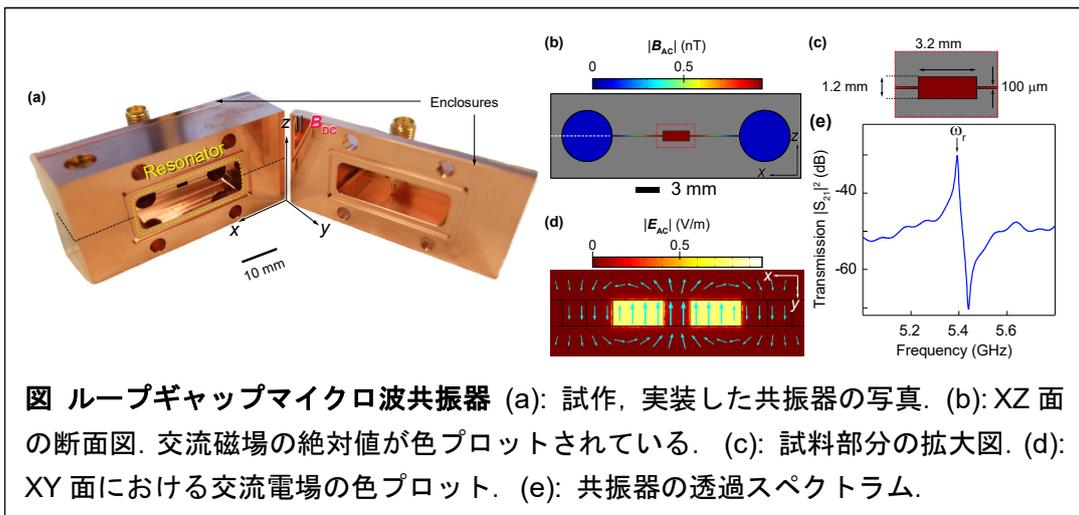


図 ループギャップマイクロ波共振器 (a): 試作, 実装した共振器の写真. (b): XZ 面の断面図. 交流磁場の絶対値が色プロットされている. (c): 試料部分の拡大図. (d): XY 面における交流電場の色プロット. (e): 共振器の透過スペクトラム.

図に得られた結果を示す. NV 中心(図 a,b)の状態 $|0\rangle$ から $|2\rangle$ への遷移を磁場約 74 mT で観測した. 図 c が各磁場において得られた共振器のマイクロ波透過スペクトラムを色プロット

したものである。NV 中心の ESR 周波数が共振器の周波数と一致する磁場（赤矢印）付近において示すレベル反交差が観測された。これは、共振器中のマイクロ波光子と NV 中心のスピン集団（スピン数 $\sim 10^{15}$ ）とが非常に強く相互作用している状況、いわゆる強結合状態の直接的な観測である [Ball et al., Appl. Phys. Lett., 112 204102 (2018)]。

置換窒素 (P1) 中心 (図 d) についても同様の実験を行った。P1 中心は ^{14}N の核スピンと電子スピン間の超微細相互作用により、ESR 遷移が三つに分裂する (図 e)。図 f に示すように、これら分裂した P1 中心の ESR 遷移それぞれに関して強結合が観測された。

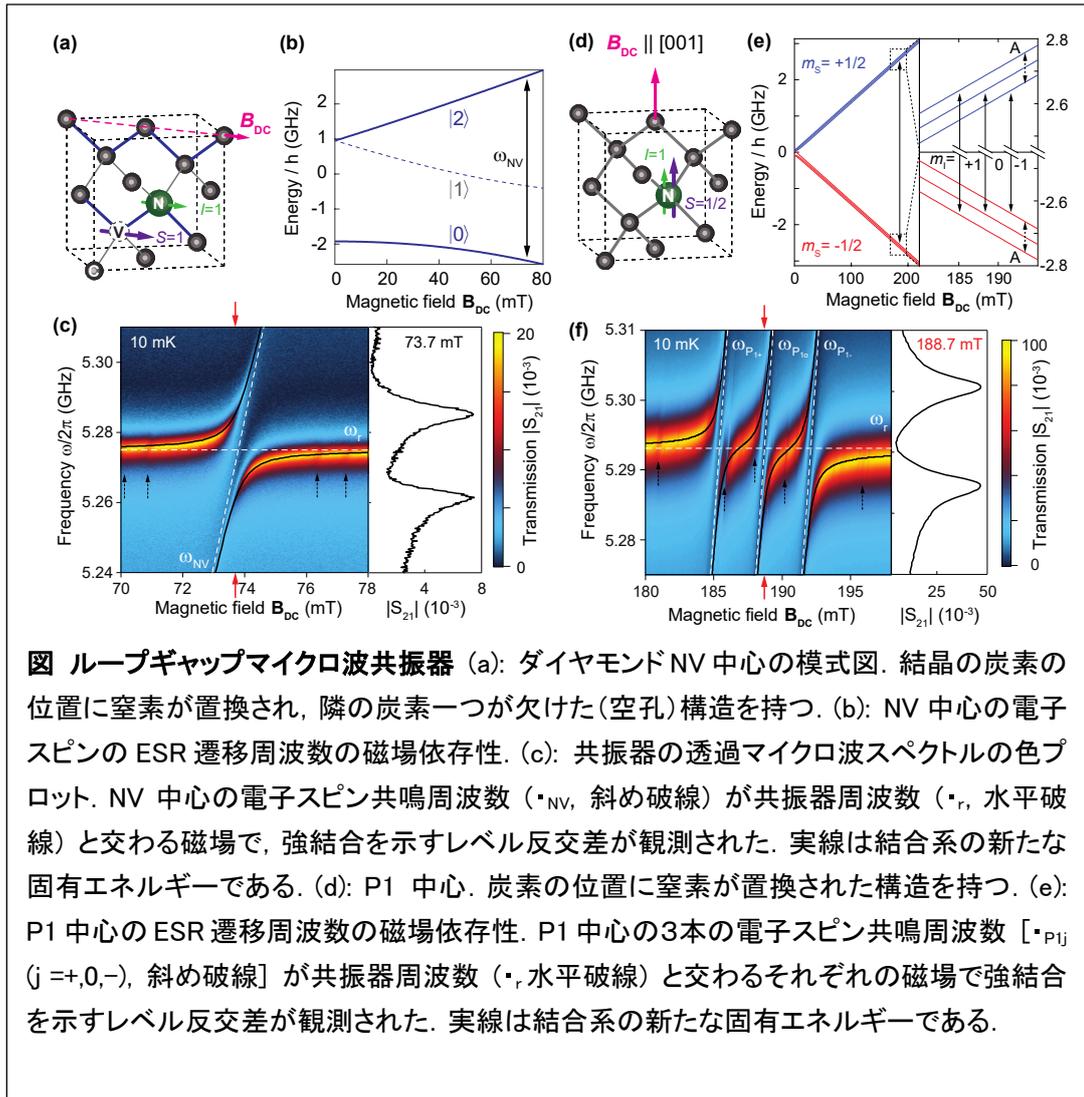


図 ループギャップマイクロ波共振器 (a): ダイヤモンド NV 中心の模式図。結晶の炭素の位置に窒素が置換され、隣の炭素一つが欠けた(空孔)構造を持つ。(b): NV 中心の電子スピンの ESR 遷移周波数の磁場依存性。(c): 共振器の透過マイクロ波スペクトルの色プロット。NV 中心の電子スピン共鳴周波数 (ω_{NV} , 斜め破線) が共振器周波数 (ω_r , 水平破線) と交わる磁場で、強結合を示すレベル反交差が観測された。実線は結合系の新たな固有エネルギーである。(d): P1 中心。炭素の位置に窒素が置換された構造を持つ。(e): P1 中心の ESR 遷移周波数の磁場依存性。P1 中心の3本の電子スピン共鳴周波数 [$\omega_{\text{P1}j}$ ($j = +, 0, -$), 斜め破線] が共振器周波数 (ω_r , 水平破線) と交わるそれぞれの磁場で強結合を示すレベル反交差が観測された。実線は結合系の新たな固有エネルギーである。

研究テーマ B「光共振器の設計と実装」

研究テーマ A で実証したマイクロ波共振器と組み合わせることを考慮し、本研究では光共振器にファブリー・ペロー型を選択した。ファブリー・ペロー共振器の室温での動作確認を終え、現在は極低温用のセットアップを設計している。

3. 今後の展開

本研究成果を更に発展させ、マイクロ波共振器と光共振器を組み合わせた二重共振器系を実現する。冷凍機内の振動の影響が無視できるような共振器の構造を実現できれば、光とマイクロ波間でのコヒーレントな変換を実証することが可能となる。

また、本研究によって実現されたループギャップマイクロ波共振器のその他の応用として、(ダイヤモンドやシリコンなどの)半導体試料中に極微量(ppb 或いはそれ以下)含まれる不純物スピンを極低温において電子スピン共鳴分光による検出や、スピンアンサンブルを用いた量子マイクロ波光子の量子 RAM などへの展開が期待される。

4. 自己評価

①:良好. マイクロ波共振器の確立ができた. 当初に意図して以上に、他の研究への幅広い応用が可能で非常に汎用的な実験系が得られた.

②:かなり良好.

③:マイクロ波共振器と光共振器を組み合わせた二重共振器系は、重力波や素粒子検出への応用の可能性を秘めており、極めて波及効果が高い。また、異なる場所にある量子コンピューターを繋ぐ量子情報通信が可能になれば、社会及び経済に多大なインパクト及び波及効果をもたらすことが期待される。

④, ⑤:極めて良好.

この光極限のさきがけの領域で知り合った異分野の研究者の方々と将来の学際的な研究に関して定期的に議論を交わす体制を作ることができた。この点に関して、総括及びアドバイザーの方々と研究者の方々にとても感謝しています。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. J. R. Ball, Y. Yamashiro, H. Sumiya, S. Onoda, T. Ohshima, J. Isoya, D. Konstantinov, and **Y. Kubo**, Appl. Phys. Lett. **112**, 204102 (2018).

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. ダイヤモンド中の不純物スピン集団とループギャップ共振器の強結合,
久保結丸, ポール ジェyson, 山城悠, 角谷均, 小野田忍, 大島武, 磯谷順一, コンスタンチノフ デニス

日本物理学会 2018 年秋季大会, 同志社大学京田辺, 2018 年 9 月 10 日,

2. 磁気共鳴の量子限界

久保結丸

日本物理学会 2018 年年次大会, 東京理科大学野田, 2018 年 3 月 22 日, (シンポジウム)

招待講演)

3. ハイブリッド量子系に向けたループギャップ共振器の開発

久保結丸, ポール ジェyson, 山城悠, 角谷均, 小野田忍, 大島武, 磯谷順一, コンスタンチノフ デニス

応用物理学会 2018 年春季講演会, 早稲田大学, 2018 年 3 月 19 日