

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：38005

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01817

研究課題名（和文）超伝導量子テクノロジーを用いた超高感度スピン共鳴

研究課題名（英文）Ultra-sensitive Spin Resonance using Superconducting Quantum Technology

研究代表者

久保 結丸（Kubo, Yuimaru）

沖縄科学技術大学院大学・サイエンス・テクノロジー・グループ・サイエンス・テクノロジーアソシエイト

研究者番号：20701436

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：ダイヤモンド中の窒素中心をマイクロ波で強くポンプすることによって反転分布させ、メーザー（microwave amplification by stimulated emission of radiation, 誘導放出によるマイクロ波増幅）増幅を実現した。この増幅器の特性や原理などを詳細に調べた結果、メーザー増幅器は極めて高い飽和パワーを持つ。

なおかつ超低雑音増幅器を実現していることがわかった。これは、量子マイクロ波技術へ極めて有用な特性である。また、反転分布形成にはダイヤモンド中の空孔クラスターが重要な役割を果たしていることも見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子技術は来たるべき第4次産業革命及びSociety 5.0時代の中核を担う技術として期待されており、研究開発が世界中で熱を帯びている。量子コンピュータに関連するハードウェアに必須の技術である「極低温マイクロ波量子技術」は特に重要視されており、とりわけ極低温における超低雑音・高効率なマイクロ波増幅はその根幹をなす必須技術である。本研究は、「スピンメーザー」による古くて新しい極低温マイクロ波増幅の方式を提案・実証し、その優位性を示すことができた。メーザーは半世紀以上前に廃れてしまった古い研究テーマであるが、当時は実現不可能だった極低温条件においては極めて有用な量子技術になり得ることを見出した。

研究成果の概要（英文）：Using an ensemble of nitrogen (P1) centers in diamond placed inside a 3D microwave resonator at 10 mK, we realized population inversion of a satellite P1 transition when a microwave pump tone is applied to the central P1 transition. This inversion is manifested by the amplification of the probe tone, namely, maser (microwave amplification by stimulated emission of radiation). We demonstrated that this “maser amplifier” is very interesting and promising for microwave quantum information and technology applications at millikelvin temperatures. We also clarified that vacancy-clusters, other defect in the diamond crystal, play an essential role to the formation of population inversion.

研究分野：量子情報技術

キーワード：量子情報技術 スピン共鳴 極低温 ダイヤモンド メーザー

## 1. 研究開始当初の背景

電子スピン共鳴 (ESR) 分光は物性物理や材料科学のみにとどまらず、化学や生物など幅広い分野に応用されている。しかしながら、スピンの偏極率の悪さ、増幅器を含めた測定ラインの雑音が非常に大きいこと、そして共振器との相互作用が小さいこと、の3つの主な原因により ESR の室温における感度は非常に悪かった。

近年、このような ESR 分光の弱点を克服するべく、低温マイクロ波技術を用いて高感度化を目指す研究がなされてきた。一方、量子情報の研究分野に目を向けてみると、固体量子デバイスを用いた研究の進展が近年目覚ましい。この分野においては、量子力学の本質に迫る研究だけではなく、量子の特性を巧みに利用した新たな動作原理を持つデバイスや技術(量子テクノロジー)の開発を念頭においた研究が非常に盛んである。このような研究分野の気運の中で、申請者は前所属機関において超伝導量子回路と電子スピンという全く異なる2つの量子系をコヒーレントに結合させハイブリッド化することに成功するなど、スピン-超伝導ハイブリッド量子系の研究を切り拓き、世界に先駆けて研究を行ってきた。

これらハイブリッド量子系の進展は一見すると電子スピン共鳴 (ESR) とは全く関連が無いように思えるが、申請者はハイブリッド量子系の技術を応用して新原理の超高感度 ESR を実証し、これをきっかけに、超伝導量子テクノロジーをスピン共鳴へと応用する研究を本格的に開始した。最終的に、量子雑音(不確定性による揺らぎ)のみを持つ超伝導パラメトリック増幅器を実装し、量子力学的な限界感度での ESR を実現した。しかしながら、この分光器が動作できるのは極めて制限された状況においてのみであった：すなわち、「20mK の極低温」かつ「10mT 以下の超低磁場」で、「シリコン或いはダイヤモンド結晶の表面ごく近傍」( $< 100$  nm)に「既知のスピンが存在」し、「基板表面が非常に平坦」な試料を準備する必要があった。従って、この量子限界感度を持つ分光器は、物性物理や化学・生物などの目的へと応用することができなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、ハイブリッド量子系と超伝導量子回路の技術を駆使し、量子力学的に限界の感度を持ちながらも汎用的な電子スピン共鳴 (ESR) 分光器を実現する。代表的な超伝導量子テクノロジーの1つである、量子力学的に最小の雑音を持つパラメトリック増幅器を汎用的な共振器と組み合わせることでこれを可能にする。商用の分光器を用いた従来の ESR 分光ではサイズが  $\sim \text{mm}^3$  のバルク試料が必要であるが、本研究で実現する ESR 分光器を用いれば僅か  $0.01 \text{ pL}$  ( $10 \mu\text{m}^3$ ) 以下の微小試料を1ミリ秒で検出できる(スピン濃度  $\sim \text{ppm}$  を仮定)。この値は汎用的な商用 ESR 分光器と比べて検出感度が8桁良く、非汎用的な低温 ESR 分光器と比べても2桁良い。最終的に、この汎用的超高感度 ESR 分光器を用いて、大型結晶が得られにくい物質系(スピン液体を示す物質やタンパク質など)においてスピン共鳴信号の検出を試みる。

## 3. 研究の方法

ESR にはマイクロ波共振器が必要なため、まず汎用的(ループギャップや誘電体)共振器を本研究用に設計・試作する。次に、量子力学的最小雑音を持つ超伝導パラメトリック増幅器(一例は図3cを参照)をXバンド(5 - 10 GHz)周波数帯用に設計・作製・評価する。申請者の現所属機関ではこのために必要な設備(精密角度制御機能付き真空蒸着器など)が整っていないが、前所属機関(仏サクレー研究所)においては設備が整っており工程も確立されている [Zhou et al., Phys. Rev. B 89, 214517 (2014)]。速やかな研究進展のために、サクレー研究所との共同研究によってパラメトリック増幅器を作成する。

## 4. 研究成果

ループギャップマイクロ波共振器の設計・作製を終え、特性評価の過程において、電子スピンそのものがマイクロ波の増幅器として非常に有用であることを見出した。いわゆる「メーザー」(microwave amplification by stimulated emission of radiation, 誘導放出によるマイクロ波増幅)の原理である。メーザーによるマイクロ波の増幅が起こることは古くから知られていたが、特性を10 mK の極低温において詳細に調べた例はこれまで無かった。本研究で、このメーザー増幅器(maser amplifier)が量子力学的に最小の雑音しか持たず、ジョセフソンパラメトリック増幅器に匹敵する超低雑音増幅を実現できることを明らかにした。加えて、極めて高い飽和パワーを有していることを確認した。このように、超伝導量子コンピュータ等の極低温で動作するマイクロ波周波数帯の量子テクノロジーに非常に有用であることを明らかにした[特許申請済、

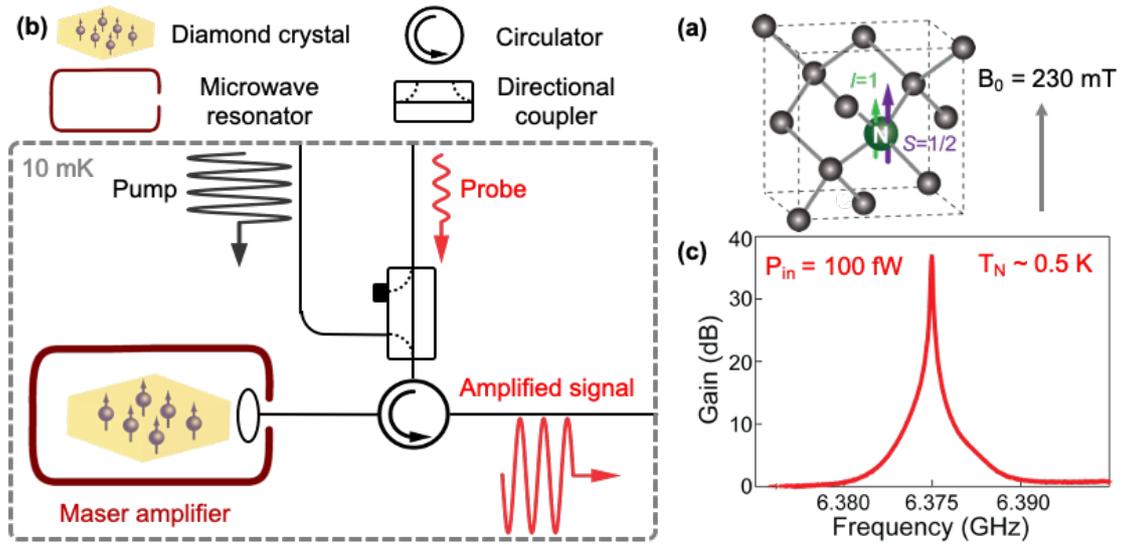


図 1. 本研究で実証したメーザー増幅器. (a) 本研究で用いた不純物電子スピン: ダイヤモンド結晶中の窒素中心 (P1 中心). (b) 実験の概観. ポンプマイクロ波によりスピンの反転分布が形成され, プロブ信号が増幅される. (c) 結果の一例. およそ 36 dB のゲインが得られ, 雑音レベルは温度に換算して約 0.5 K とほぼ量子限界だった. なお, 入力信号 100 fW は, ジョセフソンパラメトリック増幅器において報告されている飽和パワー最大値であることにも注目されたい.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ball Jason R., Yamashiro Yu, Sumiya Hitoshi, Onoda Shinobu, Ohshima Takeshi, Isoya Junichi, Konstantinov Denis, Kubo Yuimaru	4. 巻 112
2. 論文標題 Loop-gap microwave resonator for hybrid quantum systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 204102 ~ 204102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5025744	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuimaru Kubo	4. 巻 2020
2. 論文標題 Spinning Gems for Quantum Technologies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Impact	6. 最初と最後の頁 51 ~ 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21820/23987073.2020.1.51	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 6件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Yuimaru Kubo
2. 発表標題 Spin Maser for Quantum Information Technologies
3. 学会等名 OIST Mini-Symposium for Quantum Sensors of Magnetic and Inertial Forces (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久保結丸
2. 発表標題 スピンをを用いた量子情報及び量子技術
3. 学会等名 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会 「拡がりを見せる量子エレクトロニクス」 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保結丸
2. 発表標題 超伝導とスピンによるハイブリッド量子系
3. 学会等名 第40回量子情報技術研究会 (QIT40) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 則元将太, 太田守洋, Jason Ball, Petr Moroshkin, Denis Konstantinov, 久保結丸
2. 発表標題 極低温広帯域ESR測定への取り組み
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuimaru Kubo
2. 発表標題 Quantum information technologies with maser
3. 学会等名 International Workshop for Young Researchers on the Future of Quantum Science and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jason ball, Shota Norimoto, Petr Moroshkin, Denis Konstantinov, Yuimaru Kubo
2. 発表標題 Coupling an inverted spin ensemble to a microwave resonator
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Petr Moroshkin, Jason ball, Shota Norimoto, Denis Konstantinov, Yuimaru Kubo
2. 発表標題 Thermal maser in diamond
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuimaru Kubo, Jason ball, Petr Moroshkin, Shota Norimoto, Denis Konstantinov
2. 発表標題 A spin-based ultra-low noise cryogenic microwave amplification
3. 学会等名 Impurity Spins for Quantum Information & Technologies 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jason ball, Shota Norimoto, Petr Moroshkin, Denis Konstantinov, Yuimaru Kubo
2. 発表標題 Coupling an inverted spin ensemble to a microwave resonator
3. 学会等名 Impurity Spins for Quantum Information & Technologies 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Petr Moroshkin, Jason ball, Shota Norimoto, Denis Konstantinov, Yuimaru Kubo
2. 発表標題 Thermal maser in diamond
3. 学会等名 Impurity Spins for Quantum Information & Technologies 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jason ball, Shota Norimoto, Petr Moroshkin, Denis Konstantinov, Yuimaru Kubo
2. 発表標題 Ultra-low noise cryogenic microwave amplifier by spin maser
3. 学会等名 20th Anniversary of Superconducting Qubits (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jason Ball, Petr Moroshkin, 角谷均, 小野田忍, 大島武, 磯谷順一, Denis Konstantinov, 久保結丸
2. 発表標題 スピンメーザーによるマイクロ波増幅
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久保結丸
2. 発表標題 超伝導量子テクノロジーによる超高感度スピン共鳴
3. 学会等名 日本応用物理学会春期大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jason Ball, Petr Moroshkin, Denis Konstantinov, Yuimaru Kubo
2. 発表標題 Microwave amplification by thermally-induced population inversion
3. 学会等名 日本物理学会年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

## 〔図書〕 計1件

1. 著者名 久保結丸	4. 発行年 2021年
2. 出版社 NTS	5. 総ページ数 364
3. 書名 量子センシングハンドブック (量子科学技術が切り拓く新たな領域)	

## 〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 Ultra-low noise cryogenic microwave amplifier by means of spin maser	発明者 久保結丸, Jason Ball, Pter Moroshkin	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、62/813,537 (US)	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 Ultra-low noise cryogenic microwave amplifier by means of spin maser	発明者 久保結丸, Jason Ball, Pter Moroshkin	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-089451 (Japan)	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

## 〔取得〕 計0件

## 〔その他〕

Hybrid quantum device team <a href="https://groups.oist.jp/qdu/hqd-research">https://groups.oist.jp/qdu/hqd-research</a>
---

## 6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

## 〔国際研究集会〕 計0件

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------