

スピンを用いた極低温・超低雑音マイクロ波増幅 —古くて新しい量子技術の確立を目指して—

1. 研究の目的

(1) マイクロ波量子情報技術と超低雑マイクロ波増幅器

量子情報科学の分野で開発・蓄積された技術を産業化する気運が高まっている。これらは総称して「量子技術」と呼ばれ、次世代基幹技術として期待されている。その最たる例が量子コンピュータであり、日米欧中において国家プロジェクトが幾つも進行しており、開発研究の競争が激しさを増している。さらに、Google、Intel、IBM、Microsoft、アリババ集団などの主要なIT企業による大型投資も始まり、多くのスタートアップ企業も創設されるなど、量子技術には世界の産業界も注目している。

この背景には、マイクロ波周波数帯で動作する固体量子デバイスの目覚ましい進展がある。そして、その根幹をなす技術が極低温(約10mK)における**超微弱なマイクロ波信号の増幅**である。これを可能にしたのが**超伝導パラメトリック増幅器**で、雑音を重畳することなく無散逸で信号を増幅する優れたデバイスである。しかし、パラメトリック増幅器が抱える重大な問題点、すなわち**微弱な飽和パワーはいまだ本質的には解決されていない**。現在までに報告されている最高値はわずか0.1pWである。また、パラメトリック増幅器は磁場中では動作に支障が出るので、量子センシングやイメージング応用の弊害にもなる。

研究代表者らは最近、スピンメーザー(誘導放出によるマイクロ波増幅)を用いた量子マイクロ波増幅器を実現し、極めて高い飽和パワーを持ちながらも超低雑音を実現されていることを示した[特許申請済、論文準備中]。そこで本研究では、このメーザー増幅器を発展させ、超高感度スピン共鳴や量子ビットへの測定に有用であることを実証し、スピンメーザーという「古くて新しい」汎用的量子技術を確立する。

2. 研究の計画

研究代表者らが実証したメーザー増幅器は極めて有用なマイクロ波量子技術になり得ることを示しており、原理実証として価値がある。しかし、増幅の帯域幅が非常に狭い(~200 kHz)。つまり、速く時間変化する信号を増幅することは不可能であり、応用上の課題である。そこで初年度は広帯域化に取り組む。初年度は帯域~100 MHzのメーザー増幅器を開発・実証する。以下に初年度の計画・方法を記す。

(1) 広帯域導波路の組み込み

広帯域化のために、進行波型(Traveling-Wave)と呼ばれるメーザー増幅器を実現する。進行波型メーザー増幅器においては2次元の広帯域導波路がスピンを含む基板(メーザー媒質)の上にパターンされており、入力信号は伝送線路を進行する間に徐々に増幅される。この方式で帯域を大幅に拡大することが可能になる[Siegman 1964]。

2次元導波路は超伝導体薄膜を用いて作製する。メーザー増幅器をマイクロ波周波数帯で機能させるには50-300mT程度の磁場が必要なので、磁場への耐性があるNb、NbN、NbTiNなどの超伝導体薄膜を用いる。これらの超伝導体薄膜をスパッタでルビー基板上に堆積させ、光学リソグラフィと反応性イオンエッチングにより広帯域導波路を作製する。これらのプロセスに必要な装置は研究代表者の研究機関に既に存在するが、スパッタ用の超伝導体ターゲット及びリソグラフィに必要な消耗品を計上した経費で購入する。

(2) ルビー結晶の利用

初年度はメーザー媒質として素性がよく分かっており、大型基板と高濃度ドーパが容易なルビー結晶を(サファイア中のCr³⁺スピン)を用いたメーザー増幅器を実証する。Crの濃度を変化(0.01%から0.2%まで)させたルビー結晶の購入に計上した経費を使用する。

(3) 極低温マイクロ波実験

極低温において進行波型メーザー増幅器の実証をする。このためにまず磁場と周波数を実験パラメータにして最適動作点を決定する。試料を極低温に冷却するのに必要な希釈冷凍機は研究代表者の研究機関に存在する。一方で、ここで使用する低温用のマイクロ波アイソレータ、マイクロ波増幅器、超伝導ケーブルなどを計上した経費で購入する。また、ルビーに印加する静磁場を発生させるために超伝導マグネットに大電流を流す必要がある。そのために使用する専用のマグネット電源が1つ不足しているので購入する。

3. 研究の成果

(1) 広帯域導波路の作製・実証

広帯域化のために進行波型メーザー増幅器デバイスを作製した。磁場への耐性がある NbTiN の超伝導体薄膜をサファイア基板にスパッタ堆積させ、光学リソグラフィと反応性イオンエッチングを用いて2次元超伝導導波路を作製した。当初の予定ではこの作製プロセスは研究代表者の所属機関で全て完結する予定であったが、スパッタ装置の性能が NbTiN の成膜条件を満たしていないことが判明した。そこで、NbTiN の成膜に関して日本随一の経験及び設備を誇る情報通信研究機構 (NICT) の寺井弘高博士と共同研究を開始し、スパッタ薄膜の提供を受けながら本研究を遂行していくように軌道修正をした。この項目は順調に進展した。

(2) ルビー結晶の利用

進行波型メーザー増幅器には $\sim\text{cm}^2$ 以上の大型で平坦な基板が好ましく、大型基板の入手が困難なダイヤモンドは適切な材料ではない。そこで、メーザー媒質として研究実績があるルビー (サファイア中の Cr^{3+} スピン) を用いた。この項目も順調に進展した。

(3) 極低温マイクロ波実験

上記(1、2)で作製したデバイスを用いて極低温マイクロ波透過測定を行い、デバイスが設計通り広帯域に動作することを実証した。一方で、十分なマイクロ波磁場強度でのポンプが困難であり利得を生み出すことができなかった。この理由は、導波路の線幅が20ミクロンと広いためにマイクロ波磁場密度を高めることができなかったからである。これは単純な技術的な理由 (光学リソグラフィ装置の精度やクリーンルームのクラスなど) に起因する。この項目はやや遅れている。

4. 研究の反省・考察

(1) 広帯域導波路の設計・作製

広帯域導波路を作製する際に、電磁界シミュレータを用いてマイクロ波磁場強度を見積もり、必要最低限の導波路の幅を綿密に導出しておくべきであった。そうすれば現有している装置ではデバイスの作製が困難であることが比較的早い段階で明らかになったはずであり、従って導波路の作製も外注もしくは他の研究機関の装置を使用するなどの代替案へと計画を変更することで上記(3)の項目も順調に達成できたかもしれない。

5. 研究発表

(1) 学会誌等

- ① J. F. da Silva Barbosa, M. Lee, P. Campagne-Ibarcq, P. Jamonneau, Y. Kubo, S. Pezzagna, J. Meijer, T. Teraji, D. Vion, D. Esteve, R. W. Heeres, and P. Bertet, “Determining the Position of a Single Spin Relative to a Metallic Nanowire”, *Journal of Applied Physics* 129, 144301 (2021)

(2) 口頭発表

- ① Yuimaru Kubo et al., “Broadband Pulse Electron Spin Resonance Spectroscopy using a Superconducting Waveguide,” 招待講演, MRM2021 (Materials Research Meetings) Pacifico Yokohama, 2021/12/15
- ② Yuimaru Kubo, “A “masing” Spin Ensemble: Maser for Quantum Information Technologies”, 招待講演, Invited seminar series at Centre for Quantum Technology,

(3) 出版物

- ① Y. Kubo, “Hybrid Quantum Systems with Spins in Diamond Crystals and Superconducting Circuits”, in Hybrid Quantum Systems, edited by Y. Hirayama, K. Ishibashi, and K. Nemoto (Springer Singapore, Singapore, 2021), pp. 119-142.