

研究課題別評価

1 研究課題名:固有ジョセフソン接合と超伝導共振器を用いた量子状態制御の研究

2 研究者氏名:北野 晴久

3 研究のねらい:

近年、量子コンピューターに関する研究への関心が増大しているが、ほとんどの実験は希釈冷凍機を用いて初めて到達可能な数十ミリケルビンという極低温下で行われており、周辺回路まで含めた将来の実用化を考えた際に大きな障害になるものと予想される。本研究では、高温超伝導体が潜在的に持つ従来超伝導体に対する優位性がこの状況を打開する可能性を秘めていると確信し、高温超伝導体に共通の固有ジョセフソン接合(以下、IJJと略記)を用いた「量子ビット」(特に位相量子ビット)の実現により、動作温度に関する制限の緩和を目指した。さらに、超伝導共振器内に生成される単一モード光子と IJJ 量子ビットを相互作用させることにより、量子計算に本質的とされる「量子もつれ合い状態」を生成することを目指した。

より具体的には、位相量子ビットの構築に必要な次の 3 つの実験的根拠、(i) 巨視的量子トンネル(以下、MQT と略記)の実現、(ii) MQT 状態における量子化準位の形成(以下、ELQ と略記)の観測、(iii) 量子化準位間のコヒーレントな量子振動(ラビ振動)、を観測するための物理的基礎である IJJ の位相ダイナミクスの解明にまず取組んだ。また、空洞量子電磁力学(以下、cavity-QED と略記)で記述される超伝導共振器内の単一モード光子を量子ビットと結合させて量子もつれ合い状態を作り出す研究は、過去に Rydberg 原子など原子系量子ビットで行われた実績はあるが、超伝導体のジョセフソン接合(以下、JJ と略記)を用いる位相量子ビットに対しても可能かどうかは全く不明であった。このため、本研究ではまず位相量子ビットが超伝導共振器内の電磁場と強く結合するための必要条件を検討し、共振器内部の電磁場を空間的に一点に集中させる手段を検討した。

本研究で高温超伝導体が量子コンピューターへ応用可能なことが示されれば、実現可能な量子ビットに新しい有力候補が加わるだけでなく、超伝導量子ビットの動作温度に関するこれまでの制限が一気に緩和され、実用化に向けた研究がさらに加速されるものと期待される。また、発見から 20 年が過ぎた今でも未解明部分が残る高温超伝導体がベースとなる IJJ では、ジョセフソン接合の物理としても興味深い新たな未知現象が発見されるものと期待される。

4 研究成果:

(1) メサ型 IJJ 素子のスイッチング電流分布測定

本研究では、IJJ 素子を用いた位相量子ビットの構築に向けて、まず基本となる IJJ の位相ダイナミクスを把握するためにゼロ電圧状態から有限電圧状態へのスイッチング電流分布測定を行った。その結果、IJJ 素子の振舞いは従来の JJ に比べてはるかに複雑なことが判明し、位相量子ビット構築への最初のステップとなる MQT 状態を従来より高温で実現させるには、IJJ の素子サイズや素子構造が非常に重要になることが明らかになった。以下では、本研究で得られた実験結果から IJJ の本質的特徴を述べると共に、より高温で MQT 状態を実現させるための素子条件を示す。

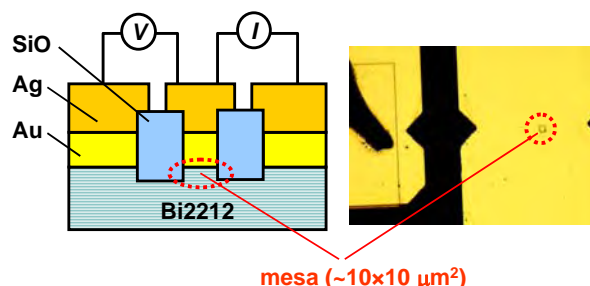


図1 メサ型 IJJ 素子の素子構造(左)と光学顕微鏡写真(右)

測定には、非常に優れたIJJとして知られる高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 単結晶を浮遊帯域溶融法で作製し、イオンミリング法を用いてメサ型構造(図1)に微細加工した素子を用いた。図2にメサ型IJJ素子に対して測定された典型的なスイッチング電流分布を示す。メサ構造の作製には通常の写真リソグラフィとArイオンミリングを用い、最小約 $10\ \mu\text{m}$ 四方の接合面積と最小約 20 層の接合数にまで制御したメサ型IJJ素子の作製に成功した。

従来のJJの古典領域に対して用いられてきた熱活性的脱出モデル(以下、SJJモデルと略記)で図2(a)の実験結果を解析したところ、 $L=40\ \mu\text{m}$ 四方の接合サイズでは、SJJモデルは実験結果を全く説明できないことが判明した。詳細な解析の結果、これはIJJの起源が層状の結晶構造にあることに関連して、接合の特徴的長さスケールであるジョセフソン侵入長 λ_J が通常よりも著しく小さくなることに原因があることが分かった。つまり、図2(a)の素子サイズでは、従来の

SJJモデルで仮定されていた位相の空間変化を無視できる「小さい接合($L < \lambda_J$)領域」の条件が満たされておらず、むしろ位相の空間変化が無視できずフラクソン励起(位相ソリトンの一種)が支配的となる「大きい接合($L > \lambda_J$)領域」に対応した脱出モデル(以下、LJJモデルと略記)を適用すべきであることが明らかになった。実際、図2(a)の測定結果をフラクソン励起を前提にしたLJJモデルで解析してみると、SJJモデルよりも定量的な一致が良いことが示された。

従来の人工的JJをベースに構築される現在の超伝導量子ビットでは、あらかじめ小さい接合として扱えるような λ_J の設計が可能である。しかしながら、IJJの λ_J は物質定数であり、設計するには超伝導転移温度などの物質パラメータを制御する必要がある。現状では、むしろ接合サイズ L の方を設計して小さい接合領域を実現させることが重要である。このため、接合サイズの小さい $L=15\ \mu\text{m}$ 四方のメサ型IJJ素子を作製し、スイッチング電流分布測定を行ったところ(図2(b)参照)、予

想に反して、SJJモデルよりもさらに分布幅が狭くなる実験結果を得た。これは上で述べた大きい接合の場合の振舞いとは全く逆である。通常、古典領域ではスイッチング電流の分布幅を決めるのは熱揺らぎであるため、測定温度から見積もられる分布幅より狭くなることはあり得ないと予想される。しかも、図3(a)に示すようにスイッチング電流の分布幅が温度減少と

広がる振舞いは、通常の熱活性的脱出過程とは逆の振舞いであり、単一の熱活性的脱出過程を前提にしたSJJモデルやLJJモデルでは説明できない振舞いであることが明らかになっ

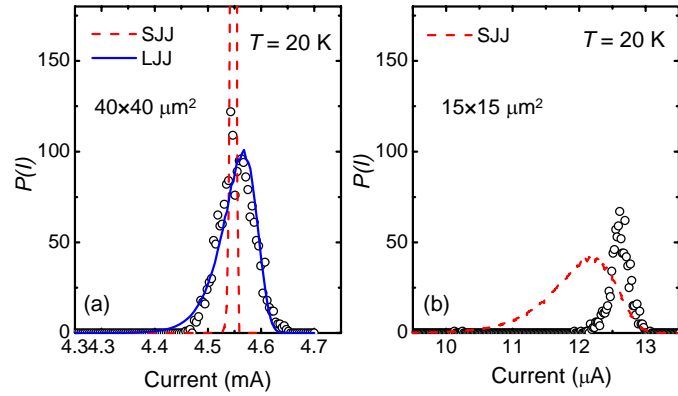


図2 メサ型IJJ素子のスイッチング電流分布
(a) $40 \times 40\ \mu\text{m}^2$ (b) $15 \times 15\ \mu\text{m}^2$

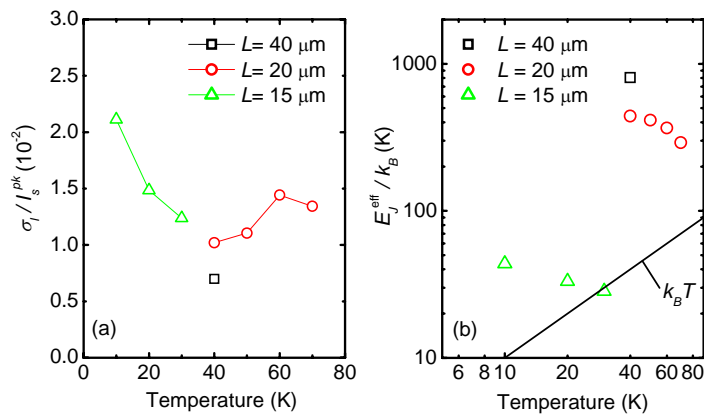


図3 (a)スイッチング電流分布幅の温度依存性
(b)実効的ジョセフソンエネルギーの温度依存性

た。こうした結果は、メサ型素子において接合サイズを小さくしても、直ちに従来のSJJモデルで説明されるような古典領域には至らず、したがってその低温側に存在するはずのMQT状態も観測が難しいことを示唆している。

この原因は、メサ型IJJ素子の実効的ジョセフソンエネルギー E_J^{eff} が接合サイズ L の減少と共に急激に減少していることに起因することが分かった。ここで E_J^{eff} は、臨界電流 I_c と接合サイズパラメーター $(\lambda_J/L)^2$ に比例する量である。図3(b)に示すように、接合サイズを $L=15\text{ }\mu\text{m}$ まで小さくすると、 E_J^{eff} が温度のエネルギースケール $k_B T$ 程度と同程度になることが判明した。ごく最近、従来のJJでも図2(b)のような振舞いが $E_J^{\text{eff}} \leq k_B T$ となる領域で観測されることが報告され、準安定状態であるゼロ電圧状態から脱出後に再び準安定状態に束縛される過程の影響が指摘された。このリトラッピング過程はSJJモデルやLJJモデルでは考慮されていない影響であり、 $L=15\text{ }\mu\text{m}$ 四方のIJJ素子における異常な振舞いは E_J^{eff} 減少に伴うリトラッピング過程の増大に起因するものと考えられる。接合サイズの減少に伴う E_J^{eff} の減少は、臨界電流密度 $j_c (=I_c/L^2)$ が接合サイズ L に依存しない場合には生じない現象であり、何らかの理由でメサ型IJJ素子の臨界電流密度が接合サイズ減少と共に急激に劣化していることが明らかになった。

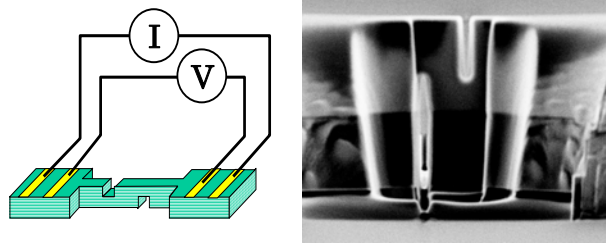


図4 S字型素子構造の模式図(左)と走査型イオンビーム顕微鏡写真(右)

(2) S字型 IJJ 素子のスイッチング電流分布測定

このような接合サイズ減少に伴う臨界電流密度の劣化は、素子構造に起因する可能性が高い。特にメサ型素子の場合には、メサ外周部の SiO_2 絶縁層への漏れ電流やメサ上部電極からの準粒子注入の影響が懸念される。このため、本研究ではS字型構造(図4)のIJJ素子の作製にも着手した。この構造では、接合周辺部が真空のため漏れ電流の影響がなく、電極部が同じ超伝導体から形成されるため準粒子注入の影響も抑制できる利点がある。作製には、通常のイオンミリング装置よりさらに微細な加工ができる集束化イオンビーム(以下、FIBと略記)装置を用いた。図2に示したIJJ素子の接合サイズは約 $0.9 \times 0.8 \times 0.09\text{ }\mu\text{m}^3$ であり、接合数は約60層と見積もられた。

図5にS字型IJJ素子に対するスイッチング電流の確率分布を示す。注目すべきは図3(b)に

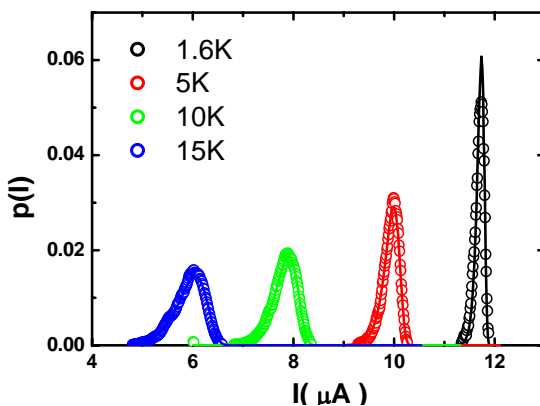


図5 S字型 IJJ 素子のスイッチング電流分布確率。実線は SJJ モデルによるフィッティング結果。

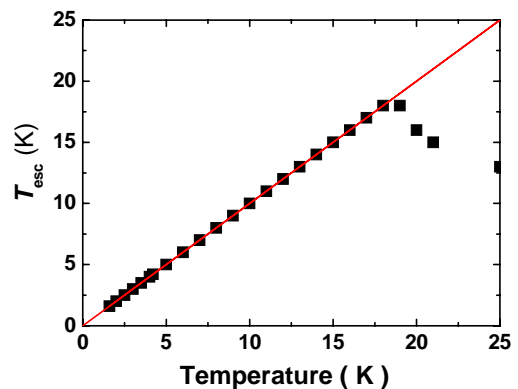


図6 S字型 IJJ 素子のスイッチング確率から得られた脱出温度

示したメサ型素子($15 \times 15\text{ }\mu\text{m}^2$)よりも接合面積が $1/200$ 以下になっているにもかかわらず、スイッチング電流の大きさがほとんど変化していないことである。これはメサ型素子に比べてS

字型素子の j_c が2桁以上向上していることを直接示している。また、図5の実線で示されるように、 $T=1.6$ Kから $T=17$ Kの温度範囲でスイッチング電流の確率分布はSJJモデルで定量的に説明できることが分かった。さらにSJJモデルとのフィッティングから得られる脱出温度 T_{esc} は $T=17$ Kまで熱浴の温度とよく一致しており(図6)、この領域では従来のJJで知られた小さい接合における古典領域とほぼ見なせることが明らかになった。

以上の研究から、高温超伝導体のIJJを用いて位相量子ビットを構築する場合の第一ステップであるMQT状態を実現するには、少なくとも以下の条件が必要であることが示された。即ち、(1) 接合サイズが $1\text{ }\mu\text{m}$ 四方程度であること、(2) 臨界電流密度が 1 kA/cm^2 以上あること、の2つである。現在、 $T=1$ K以下の極低温領域までスイッチング電流分布測定が可能な測定系を立ち上げ中であり、これによりMQT状態の直接観測が実際に可能になるものと期待される。

(3) 超伝導共振器内の電磁場分布解析

超伝導共振器内の単一モード光子とIJJ位相量子ビットを結合させて量子もつれ合い状態を作るには、両者の強結合条件が満たされなければならない。このため、本研究では様々な共振器構造に対して3次元電磁界解析シミュレーターによる電磁場分布解析を行い、共振器内の共振電場を空間的に一点に集中させて強結合条件を実現させる手段を検討してきた。その結果、図7(a)に示す共振器構造が非常に有効なことが分かった。

この共振器は、円筒形のリエントラント型空洞共振器と類似の構造を持ち、共振器下部の金属ステージ上にIJJ位相量子ビットとなる素子を設置し、共振器上部から伸びた金属探針を用いて共振電場を局所的に集中させる。実際に3次元電磁界解析シミュレーターを用いて共振器内に生じる共振電場の空間分布を調べたところ、金属探針の先端に共振電場が集中することが分かった(図7(b)参照)。

金属探針により電界強度が増強される効果は、図8からも明らかである。この共振モードは、円筒の中心軸に平行な共振電場成分を持つため、IJJ素子の接合面に垂直にマイクロ波電場を加えることが可能である。共振周波数に関しては、基本モードは円筒の直径や高さを調整することにより自由に設計できる他、高次モードの利用も可能なため、極低温用の測定インサートの先端に搭載しても10 GHz から100 GHz の周波数範囲を十分カバーできることが分かった。

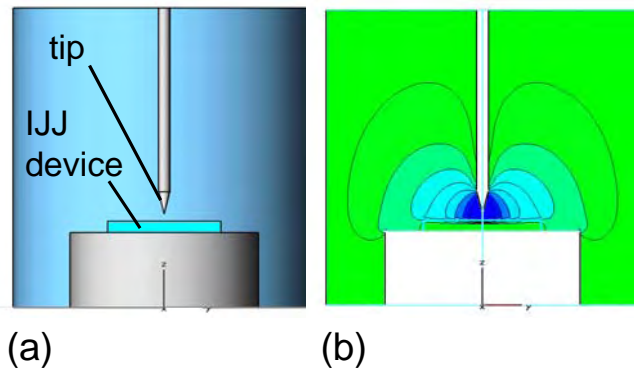


図7(a) 検討した超伝導共振器の模式図
(b) 電磁界解析から得られた共振電場の空間分布

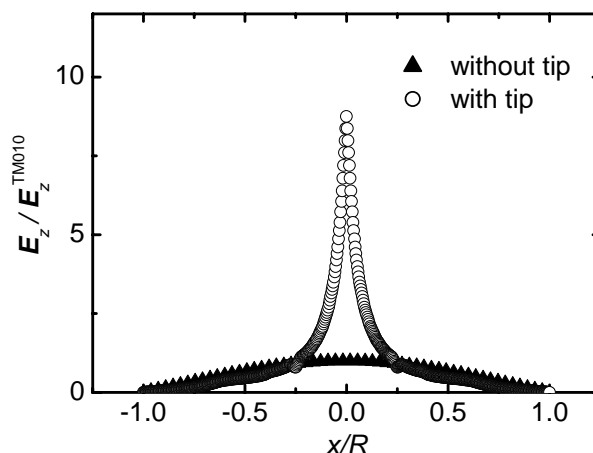


図8 電磁界解析から得られた電界強度分布

図7に示す共振器構造では、金属探針を素子から 100 μm の距離にまで近づけることにより 1 光子当たりの電界強度を 100 mV/m 程度にまで強められることが数値解析から明らかになった。この値は従来の cavity-QED 実験で用いられた Nb 超伝導体のファブリ・ペロー型共振器に比べて 100 倍近い増倍であり、本研究開始後に報告されたコプラナー型ストリップライン共振器とジョセフソン電荷量子ビットによる cavity-QED 実験と同程度の電界強度である。したがって、本研究で得られた超伝導共振器構造が量子もつれ合い状態を生成するための cavity-QED 実験に十分適用可能なことが示された。

5 自己評価:

本研究では、高温超伝導体の IJJ を用いた位相量子ビットの構築に向けて、まず基本となる IJJ の位相ダイナミクスを把握するためにゼロ電圧状態から有限電圧状態へのスイッチング電流分布測定を行った。その結果、IJJ の位相ダイナミクスが当初予想していたよりもはるかに複雑なことが判明し、高温超伝導体の優位性を生かしてより高温で MQT 状態を実現させるには、IJJ の接合サイズや素子構造が非常に重要になることを見出した。具体的には、接合サイズが $1\mu\text{m}$ 四方以下であること、臨界電流密度が $1\text{kA}/\text{cm}^2$ 以上あること、の 2 つが必要条件であり、両者を満たす素子構造として FIB 加工による S 字型構造が優れていることが明らかになった。

本研究が目指した高温超伝導体を用いた量子ビットの実現は、まだ誰も成功していないが誰もが夢見る壮大な研究テーマである。本研究で独自に提案した IJJ を用いた位相量子ビットは、非常に挑戦的ではあっても最も実現可能性の高い量子ビット候補であると信ずる。本研究では、単結晶試料を微細加工して素子を作製するプロセスの構築や基本測定系の立ち上げから研究を開始し、約 3 年間で基本となる IJJ の位相ダイナミクスを把握し MQT 観測の一手手前のところにまで辿り着いた。残念ながら、高温超伝導体の IJJ 素子における MQT の観測や ELQ の観測に関しては、S 字型構造から研究を始めた別の研究グループ(東北大通研と NIMS の共同グループ、独国 Erlangen 大グループ、産総研グループ)がついに最近報告してしまい一番乗りを逃してしまったが、本研究で得られた研究成果は彼らの観測結果とは相補的関係にあり、共に当初予想した高温超伝導体の IJJ の優位性を示す重要な研究成果であると見なせる。加えて、当初予想していなかった「大きい接合」領域でのフラクソン励起を利用した新しいフラクソン量子ビットの可能性を見出したという意味で、IJJ の新しい側面を切り拓く重要な研究成果も得られたと自負する。

本研究が目指したもう一つの研究テーマである cavity-QED の原理を利用した量子もつれ合い状態の生成に関しては、本研究の開始以前に超伝導量子ビットに適用した報告は一切なく、非常に画期的アイデアであったと自負している。本研究では、この cavity-QED 実験に適用可能な超伝導共振器構造を提案し、その電磁場分布を数値的に調べるに留まったが、本研究の開始後、別の研究グループ(Yale 大, Delft 工科大, NTT)から従来の人工的 JJ を用いた超伝導量子ビットと超伝導共振器を組み合わせた cavity-QED 実験が報告された。そこで用いられた超伝導共振器と本研究で提案したものを比べると、本研究で提案した構造の方が設計や制御性の自由度が高く、より高度な制御操作が可能である。特に本研究で示した超伝導共振器は、原理的に従来の人工的 JJ を用いた超伝導量子ビットにも十分適用可能である。したがって、今後は数値シミュレーションだけでなく、実際に超伝導共振器を作製し、その効果を実証していきたいと考えている。

6 研究総括の見解:

固有ジョセフソン接合の研究において、北野晴久研究者はメサ型 IJJ 素子を作成し電流分布測定をし、「大きい接合領域でのフラクソン励起」という予想に反する結果を得、そこから高温超伝導物質について物理的に興味深い知見を得ました。その成果を高く評価します。

本来の研究目的のために、それを S 字型に切り替えて MQT 状態の直接観測可能なところまで進めた研究推進力にも敬意を払います。高温超伝導量子ビットの可能性についての重要な成果だと思いますので、今後の発展を期待します。

7 主な論文等:

論文 5 件

[1] H. Kitano, K. Ota, A. Maeda, “Study of switching events from zero-voltage state of Bi2212 intrinsic Josephson junctions”, Supercond. Sci. Tech. **20**, S68–S73 (2007).

[2] K. Ota, H. Kitano, A. Maeda, “Escape rate from the zero-voltage state in the intrinsic Josephson junctions of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ ”, Physica C **445–448**, 955–958 (2006).

[3] H. Kitano, K. Ota, A. Maeda, “Superconducting cavity resonator with a metallic tip for realizing strong coupling between superconducting qubits and microwave photons”, American Institute of Physics Conference Proceedings **850**, 943–944 (2006).

[4] A. Maeda, H. Kitano, L. Gómez, T. Kubo, K. Ota, T. Ohashi, “High- T_c Josephson junction: towards improvement of $I_c R_n$ product and realization of phase qubits”, J. Phys. Conference Series **43**, 1151–1154 (2006).

[5] H. Kitano, K. Ota, A. Maeda, “Switching current distribution in large $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ intrinsic Josephson junctions”, Physica C, accepted for publication.

特許 なし

受賞 1 件

Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005) ベストポスター賞 (H17.12)

招待講演 なし