

# 超伝導磁束量子ビットの単一回読み出し

NTT物性科学基礎研究所では、超伝導永久電流の重ね合わせ状態で実現された磁束量子ビットについて、単一回状態読み出しに世界で初めて成功しました。超伝導状態を利用した量子ビットのメリット、単一回読み出し実験の概要、今後の課題などを紹介します。

せんば こういち  
仙場 浩一

NTT物性科学基礎研究所

## 超伝導量子ビットの背景

量子コンピュータの基本構成要素である量子ビットを1個の原子や1個の電子へのアクセスによって実現しようという試みが、現在、世界中の研究機関で進行しています。しかし、もしも百万個、一億個といった粒子（原子・電子）集団の状態を使って量子ビットをつくることができるならば、個々の原子や電子の状態を制御し、読み出すという非常に困難な過程を回避できます。しかし、量子ビットの必須条件である「ビットを定義する2つの量子状態の重ね合わせ状態を実現し、自由に制御できること」と「多数個の粒子を用いて量子ビットをつくること」とは、一見相いれない条件のように思われます。ところが粒子のド・ブロイ波<sup>\*1</sup>が巨視的な距離にわたってコヒーレントな状態にある超伝導状態や、ボース・アインシュタイン凝縮相<sup>\*2</sup>のような巨視的量子状態<sup>(1)</sup>を使えば、この欲張りな条件は実現することができるのです。数百万個の電子のコヒーレントな状態が構成される超伝導量子ビットは、現在の微細加工技術で作製可能です。素子の寸法はマ

イクロメートル程度であり、原子サイズに比べるとはるかに大きなスケールです。この巨視的量子状態を用いた量子ビットが最近注目を集めています。

## 超伝導状態

超伝導金属の温度を下げると、超伝導臨界温度と呼ばれる相転移温度( $T_c$ )で抵抗が消失し、超伝導体内部から磁場が排除され始めます。これは、超伝導金属中の全伝導電子が超伝導体全体にわたって位相を含めて唯一の状態に凝縮し始めるからです。強磁性体(磁石)では、 $T_c$ 以下で秩

序変数である磁化が自発的に成長するように、超伝導体では、凝縮対の波動関数( $\Psi = \exp[i\phi]$ ,  $\phi$ :位相)自身が秩序変数です。常伝導金属では、基底状態( $E_F$ )のすぐ上から伝導電子の状態が連続的に存在しています(図1)。一方、 $T_c$ より十分低温の超伝導金属では、励起状態は

\*1 ド・ブロイ波: 1923年にLouis de Broglieによって導入された物質波の概念で、運動量(p)を持つ粒子のド・ブロイ波長は  $\lambda = h/p$  と定義されます。hはPlanck定数。

\*2 ボース・アインシュタイン凝縮相: ボース統計に従う粒子(ボソン)系において巨視的な数の粒子が最低エネルギー状態に凝縮することで出現する巨視的量子状態。

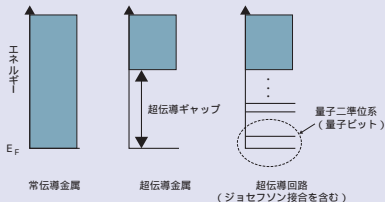


図1 超伝導状態と量子二準位系(量子ビット)

基底状態から有限のエネルギーだけ隔たって存在しています。これは超伝導状態では、電子はクーバー対と呼ばれる一種の分子状態を形成しており、凝縮したクーバー対を励起するには、対の束縛エネルギーに打ち勝つエネルギーを与えて1個のクーバー対を壊して2個の伝導電子にする必要があるからです<sup>(2)</sup>。またこの超伝導ギャップは、ギャップ内の量子状態を外界から適度に隔離し、さまざまなノイズから守る役目も果たします。

## 量子ピットをつくる

さて、では実際に超伝導体を用いて量子ピットをつくるにはどうしたらよいのでしょうか？ 超伝導体でLC共振回路をつくれれば、この超伝導ギャップ中に、超伝導電流のプラズマモードが立ちます。ところがこのLC共振モードは調和振動的であり、すべての単位間隔が等しく、二単位を特定して量子ピットとするには不向きです。そこで重要となるのがジョセフソン接合です。

ジョセフソン接合とは、クーバー対がトンネル効果で行き来できるほど薄い絶縁層を2つの超伝導体で挟んだ構造を持つ素子のことです。絶縁層付近は、クーバー対の密度が低く、超伝導秩序が局所的に弱められた部分です。

例えば、ジョセフソン接合を流れる超伝導電流は、接合の両側の超伝導体の位相の差のSin関数で表されることが知られています（ジョセフソン効果<sup>(3)</sup>）。位相差は2の周期関数であるため、強い非線形性を持っています。ジョセフソン接合を含む超伝導回路の量子状態は、この非線形性を反映してほどよい非調和性を持つため、超伝導ギャップ内に量子二単位素子（量子ピット）を準備することができ

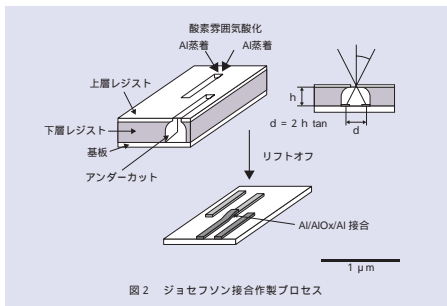


図2 ジョセフソン接合作製プロセス

ます。

典型的な超伝導材料であるアルミニウム (Al) を用いた微小ジョセフソン接合作製プロセスの概要を図2に示します。

シリコン基板上に図のように二層レジスト構造を準備し、上層レジストに電子ビームリソグラフィ技術を用いて微細パターンを描きます。これを溶液中で化学的に現象して、下層レジストにアンダーカットを持つ構造を得ます。真空蒸着装置中で- 方向からAlを蒸着直後、酸素を導入し (AlOx) 絶縁層を形成後に真空度を上げて+ 方向から再度Al蒸着します。その後、リフトオフ<sup>\*3</sup>によりレジストを取り除くとサブミクロン寸法のAl/AIOx/Al構造を持ったジョセフソン接合が得られます<sup>(4)</sup>。このような方法を用いてAlリング中に3個のジョセフソン接合を含む量子ピットをつくることができます（図3(a)）。量子ピットを構成する二単位は、リングを右回り (R>), 左回り (L>) に流れる超伝導永久電流の重ね合わせ状態です。二単位のエネルギーは、リングを貫く磁束 (  $\text{qubit} = f \phi_0, \phi_0 = h /$

(2e) : 超伝導磁束量子) の関数で、図3(b)のように変化します。量子ピットの基底状態 (  $0 >$  : 赤) は、磁束  $f$  の増加に伴い  $R > L >$  へと変化し、第一励起状態 (  $1 >$  : 緑) は  $L > R >$  に変化します。破線で示した古典的な状態  $R >, L >$  のエネルギーが等しい  $f = 1.5$  では、これら二状態 (  $R >, L >$  ) の量子力学的な結合により、古典的状态では不可能な  $0 > R > + L >, 1 > R > - L >$  のような重ね合わせの状態がエネルギー固有状態として実現しています。

## 検出器SQUID

私たちは、量子ピットの状態検出器に、SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) 素子 (図3(a)) を用いています。SQUIDは、2つの等価なジョセフソン接合を含むリング状の量子干渉素子で、リング内の磁束を磁束量子  $\phi_0$  の1000分の1程度の極めて高い感度で

\*3 リフトオフ：蒸着の後で有機溶媒等により必要な構造を残してレジスト層を取り去るプロセス。

検出することができます。電圧を伴わずにSQUIDに流せる最大超伝導電流（スイッチング電流）は、SQUIDを貫く磁束（ $\Phi$ ）の関数として図4(a)のように  $2I_0 \cos(\Phi / \Phi_0)$  で変化します。量子ビットの永久電流がつくる磁場が反転する  $\Phi = 1.5$  付近（図4(b)）のデータを拡大すると、字状をした量子ビットからの信号が見られます。実際には、量子ビットの信号がSQUIDのS/N比が最大となる領域に現われるように、量子ビットとSQUIDの2つのループの面積比は最適化されています。

### 単一回読み出し

$2I_0 \cos(\Phi / \Phi_0)$  のバックグラウンドを引き去った量子ビットからの信号を測定温度の関数として図5(a)に示します。字状のデータ分布の1点1点が単一回の測定結果に対応します<sup>(5),(6)</sup>。ガイドラインを示したステップ状の分枝が量子ビットの基底状態、他方の分枝が第一励起状態に対応する信号です。ここで大切な点が2つあります。

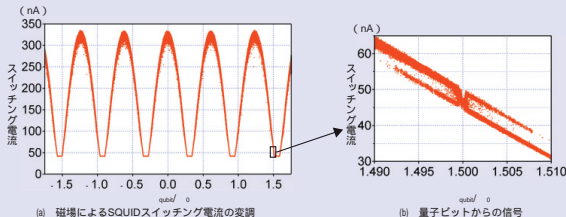
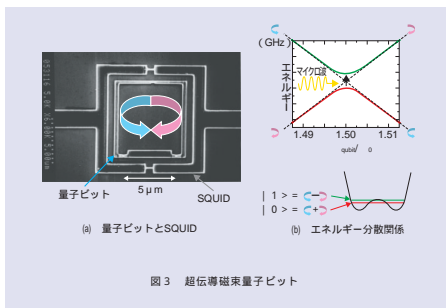
1つ目は、図5(a)のデータが、基底状態、励起状態のいずれかに、はつき

りと分別されて読み出されていること。これは、この測定が単一回読み出しであることを表します。

2つ目は、25 mKから300 mKの範囲では、温度が変わっても基底状態、第一励起状態の分枝のかたちは変わらず、二状態へのデータの分布だけが変化していることです。これは読み出されている状態が量子状態であることを裏づけています。外部磁場を固定して、各磁場でのデータを平均した後の読み出し結果を示したものが図5(b)で、こちらは期待されたとおり量子ビッ

トのステップが温度上昇に伴って緩やかになっていることが分かります。

次に、量子ビットに共鳴マイクロ波を照射した場合の実験結果を図6に示します。図6(b)に示すグラフは、図6(a)の破線部分でのデータの断面に相当します。共鳴マイクロ波の照射によって、励起状態の占有割合が顕著に増加していることが分かります。これは量子ビットの任意操作に向けた第一歩と位置づけられます。



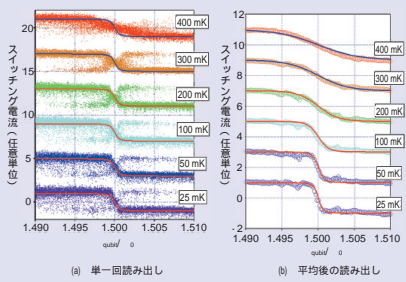


図5 SQUIDによる量子ビットの読み出し

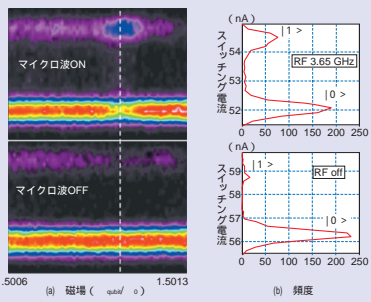


図6 共鳴マイクロ波による量子ビットの励起

ヒーレンス時間  $T_2(\text{Rabi}) = 30 \text{ ns}$  が得られています。今後、1量子ビットの coherent 操作、複数量子ビットのゲート操作を実現するためには、現状の ns オーダのデコヒーレンス時間をいかに延ばすことができるかがもっとも重要な課題となります。

参考文献

- (1) A. J. Leggett : " Macroscopic Quantum Systems and the Quantum Theory of Measurement , " Prog. Theor. Phys. Suppl. Vol.69, p.80, 1980.
- (2) J. Bardeen , L. N. Cooper and J. R. Schrieffer : " Theory of Superconductivity , " Phys. Rev. Vol.108, p.1175, 1957.
- (3) B. D. Josephson : " Possible New Effects in Superconductive Tunneling , " Phys. Lett. Vol.1, p.251, 1962.
- (4) G. J. Dolan : " Offset masks for lift-off photoprocessing , " Appl. Phys. Lett. Vol.31, p.337, 1977.
- (5) H. Tanaka , Y. Sekine , S. Saito and H. Takayanagi : " DC-SQUID readout for qubit , " Physica C 368, p.300, 2002.
- (6) 高柳・田中・齋藤・中ノ : " 超伝導の磁束状態を用いた量子ビットの状態測定 , " 応用物理, 第72巻, 第1号, p.36, 2003.



仙場 浩一

量子ビット研究の流れは、原子1個へアクセスするか、人工的な原子をつくって、その安定度を高めるか、大きく2つの方向があります。巨視的量子状態できた人工原子(超伝導量子ビット)は、まだ誕生したばかりで、ほんの数年の歴史しかありません。その可能性に期待したいと思います。

問い合わせ先  
 NTT物性科学基礎研究所  
 機能物質科学研究所  
 超伝導量子物理研究グループ  
 TEL 046-240-3544  
 FAX 046-240-4722  
 E-mail semba@nttrf.jp  
 URL <http://www.bfj.nitt.co.jp/group/shisurp-q/index-j.html>

今後の課題

以上述べてきましたように、NTT物性科学基礎研究所では、SQUIDを用いた超伝導磁束量子ビットの単一回状態読み出しに世界に先駆けて成功しました。この単一回読み出しは、将来の量子コンピュータの動作に必要な不可欠な条件です。今回紹介したのは、

SQUIDのバイアス電流を数百Hzで変化させる手法での状態読み出しですが、将来的に超伝導磁束量子ビットを実際の量子コンピュータの素子として動作させるためには、高速パルスを用いた時間領域での操作を確立する必要があります。

予備的なパルス実験からは、量子ビットの緩和時間  $T_1 = 1.6 \mu\text{s}$ 、デコ