

巨視的量子コヒーレンス研究チーム

Macroscopic Quantum Coherence Laboratory

チームリーダー 蔡 兆 申
TSAI, Jaw-Shen

当研究チームでは磁束量子ビットの動作に成功した。4 接合磁束量子ビットにスイッチング型読み出し SQUID を直結した素子での量子振動実験に成功した。量子コヒーレンスが持続する時間であるデコヒーレンス時間は約 0.5 マイクロ秒であり、これはスピネコー方により約 2 倍の 1.2 マイクロ秒程度まで増加させることができた。このデコヒーレンスは「1」状態が「0」状態にエネルギー緩和を起こすことに起因していることが分かった。このようなエネルギー緩和は、素子環境における背景磁束ノイズによるものと見られている。

電荷量子ビットにおいては、高周波数領域に存在するエネルギー緩和を誘起する量子ノイズを分光的に評価した。ほぼ線形なスペクトラルが得られた。電荷量子ビットのデコヒーレンスの要因が特定されたことにより、このデバイス性能の最適化が可能になった。

ニオブ系量子ビットの実現に向けた、ニオブを電極とするトンネル接合の微細化の研究を行っている。微細接合を 2 個直列につないだニオブ単電子トランジスタを実現した。

1. 磁束量子ビットの動作に成功 (吉原, 山本, 蔡)

電子や原子のような微小な世界では、量子力学の物理法則が支配しており、粒子は同時に波としての性質を持つようになる。電子を例にとると、量子の世界では電子波として空間的に広がった存在になる。量子コンピュータとは、このような電子などの量子力学的状態を利用して演算するコンピュータである。この技術が実現すれば、現在のコンピュータをはるかに越える計算能力を持つ（現在では数千年もかかるような数億桁の数字の素因数分解が数秒で解ける）と期待されている。量子コンピュータは、具体的には「量子ビット」と呼ばれる演算単位で計算する。量子ビットは、「0」と「1」という 2 つの量子状態を波と同じように重ね合わせることで同時に実現する。この重ね合わせができるのは、原子や分子などが量子力学的な波の性質を持っているからである。このようにして「0」と「1」を同時に実現できることが量子ビットの優れた点である。さらに「量子の絡み合い」と呼ばれる量子力学特有の現象で、数多くの量子ビット同時に操作することが可能になる。量子絡み合いにより一体となった量子状態は、局所的な量子ビット操作が全体の量子状態に影響を及ぼすことができるので、超高速情報処理が実現する。

我々は 1999 年、超伝導体を電極とする微小ジョセフソン接合を用いた単一電子対箱で量子ビットを構成したゲート電圧パルスにより、電子対箱中の電荷量を制御し、量子の重ね合わせ状態を実現することで、固体電子素子による量子ビット 1 個の動作に世界で初めて成功している。ジョセフソン接合とは、超伝導体を弱く結合し、その間を超伝導電流が流れる接合である。またこのような量子ビットを 2 個キャパシターで結合させることにより量子論理ゲートを実現している。

超伝導量子ビットは上記の電荷量子ビット以外にも、数種のジョセフソン量子ビットが既に実験的に検証されている。現時点ではどの量子ビットの将来性が高いか、現在のところまだ完全に見極められていない。また現状の電荷量

子ビットの性能は決して満足のいくものではない。このような状況で我々は、電荷量子ビット以外にも磁束量子ビットの実験を立ち上げてきた。

今回試作に成功した磁束量子ビットは、4 接合を有する対称性のいい磁束量子ビットであり、読み出しのためのスイッチング型 SQUID が直結している設計である。この素子での量子振動実験に成功した。マイクロ波を照射しラビ振動観測し、振動周波数がマイクロ波の振幅に比例して早くなることも確認した。マイクロ波の $\pi/2$ パルスを時間差を与え 2 回照射するときに得られるラムゼー振動により、量子コヒーレンスが持続する時間であるデコヒーレンス時間は約 0.5 マイクロ秒と評価された。これは素子を「0」と「1」の縮退点にバイヤスしたときの値で、この点から外れると背景ノイズの影響を受けやすくなり、デコヒーレンス時間はすぐに短くなる。またスピネコーというパルスのかけ方により、低周波ノイズにより失われたコヒーレンスの情報を回復することができ、デコヒーレンス時間を約 2 倍の 1.2 マイクロ秒程度まで増加させることができた。このデコヒーレンスは「1」状態が「0」状態にエネルギー緩和を起こすことに起因していることが分かった。エネルギー緩和時間も同じく 1.2 マイクロ秒であった。このようなエネルギー緩和は、素子環境における背景磁束ノイズによるものと見られている。

2. 電荷量子ビットの量子雑音観測 (Astafiev, Pashkin, 山本, 中村, 蔡)

1 つの量子ビットの状態を読み出すとき、強い読み出しの場合、量子ビットの状態は 0 か 1 の状態に射影される。このような読み出しを単一事象読み出しと呼ぶ。昨年度我々は読み出し効率の大変高い電荷量子ビットの単一事象読み出し法を確立した。これは単一電子トラップと単電子トランジスタを、電荷量子ビットに結合した回路方式で実現した。トラップのポテンシャルをゲートで制御することにより、読み出しをしたいタイミングで量子ビットから余剰の

電荷をトラップに移動させることができる。トラップに移動した余剰電荷はそこにしばらく (0.5 ms) 閉じ込められるので、その間にトラップに隣接している SET 電荷計でゆっくり余剰電荷を読み出す。余剰電荷を検出する確立は、電荷量子ビットの「1」の確立に比例している。このような方法で、約 90% の高効率で「1」状態を的確に読み出すことができ、そのときの量子振動の振幅変動率は約 70% であった。振動の振幅が読み出し効率より少し低いのは、量子ビットの書き込みの効率が我々の DC パルス駆動法においては必ずしも 100% ではないためである。

本年度我々は、上記の読み出し方法を使い電荷量子ビットにおけるノイズの分光測定を行った。これは電荷量子ビットをノイズディテクターとして使用した実験で、原理としては、ノイズスペクトラル密度に比例して量子ビットのエネルギー緩和時間が短くなることを利用している。手順としては高速な非断熱 $\pi/2$ パルスでまずコヒーレントな「1」状態を準備する。その後ゆっくりとバイアス点を断熱的に変化させ、新たなバイアス点でエネルギー緩和時間を観測する。このようにしてバイアス点を走査しながらエネルギー緩和時間をそれぞれの点で評価する。最後にバイアス点の情報を周波数に (それぞれのバイアス点は異なる量子ビットエネルギーを持つ)、エネルギー緩和時間をノイズスペクトラル密度に置き換えると量子ノイズの分光情報が得られる。

その結果周波数にほぼ線形に比例するノイズ成分の存在が分かった。このノイズは環境温度よりも高い周波数領域で特に顕著に現れる。量子ノイズと呼んでいるのはそれゆえである。重要なのは、このようなノイズの特性から、これは電荷のゆらぎに起因する雑音であることが理解できたことである。その結果、電荷量子ビットでは、静電エネルギーを小さくすればするほど、デコヒーレンス時間が増加するという重要な回路設計方針が得られた。

3. ニオブ系微細トンネル素子試作 (Im*, Pashkin, 中村, 蔡)

ジョセフソン量子ビットの準粒子の励起を抑えることと単位接合面積あたりのジョセフソンエネルギーを大きくするため、アルミ電極の代わりにニオブ電極を使って素子を試作した。2つの微小トンネル接合より成る SET 回路の試作を行った。将来的にはニオブ量子ビットを作成する予定である。

現在アルミ系の量子ビットの作成手段として成功している、懸架マスクを利用したリフトオフ法を用いて Nb 系 SET を試作した。この方法は膜材料の飛来する方向がそろった真空成膜が不可欠であり、点状の物質源を持つ電子ビーム蒸着法が理想的な成膜法である。しかし Nb の蒸着膜は、蒸着時に近傍の不純物ガスをよく取り込む性質があり、それにより超伝導転移温度が下がる傾向がある。特にリフトオフマスクのスペーサーに使われる PMMA は、ガス析出の源となり、そのためにこの方法で作った微小な大きさのニオブ蒸着膜の超伝導転移温度は低下する傾向がある。我々はスペーサー材料を工夫して Nb 蒸着膜の膜質の劣化を低減させることに既に成功している。今期は、トンネル障壁に酸素イオンラジカルビーム源を使ったニオブ酸化膜を作成することでトンネル障壁を作ることに成功し、この新た

な技術を使って接合を作成した。作成した単電子トランジスタの電荷相当ノイズは、特にアルミの単電子トランジスタと異なった特性は得られなかった。現在この新しい接合の詳細な解析を行っている。

* 客員研究員

In this fiscal year, we have succeeded in the operation of the flux qubit. It consisted of a superconducting ring inserted with 4 Josephson junctions in series. The operation was carried out at the degeneracy point of where the external magnetic field is equal to half a flux quantum. A microwave pulse was applied to initiate the quantum oscillation. The readout was done by a DC SQUID, directly coupled to the qubit. When a readout pulse was applied to the readout SQUID, it switched to the voltage state only when the qubit was in the “1” state. When the external magnetic field and external DC bias current was tuned to the optimal values, the decoherence time was about 0.5 microseconds as estimated by the Ramsey oscillation. The spin-echo pulse sequence was employed, and it could recover the lost coherence and extend the decoherence time to 1.2 microseconds. We found the decoherence process was mainly triggered by the fluctuation of Josephson energy of the qubit.

We carried out the noise spectroscopy of the charge qubit, using the qubit as the quantum noise detector. The energy relaxation time was proportional to the noise spectral density, so the evaluation of the relaxation time at different charge bias points gave us the noise spectrum. We found the quantum noise at high frequency was linear in frequency. The noise was attributed to the fluctuation in charge, and it was shown that the decrease of the charging energy could increase the decoherence time of the charge qubit.

Research Subjects

1. Josephson qubit control
2. Josephson qubit readout
3. Decoherence

Staff

Head

Dr. Jaw-Shen TSAI

Research Scientists

Dr. Yuri PASHKIN

Dr. Oleg ASTAFIEV

Dr. Fumiki YOSHIHARA

Mr. Yasunobu NAKAMURA* (NEC Fundam. Environ. Res. Lab.)

Dr. Tsuyoshi YAMAMOTO* (NEC Fundam. Environ. Res. Lab.)

(* part time)

Visiting Members and Postdoctoral Fellows

Dr. Boris ALTSHULER (Princeton Univ./ NEC Lab. America, USA)

Dr. Dmitri AVERIN (State Univ. New York, Stony Brook, USA)

Dr. Hyunsik IM (Dongguk Univ., Korea)

Dr. Seth LLOYD (MIT, USA)

Dr. Michio WATANABE (NIST, USA)

誌 上 発 表 Publications

[雑誌]

(原著論文) *印は査読制度がある論文

Watanabe M.: “Single-electron transistors in electromagnetic environments”, *Phys. Rev. B* **69**, 094509-1–094509-7 (2004). *

Astafiev O., Pashkin Y., Yamamoto T., Nakamura Y., and Tsai J. S.: “Single-shot measurement of the Josephson charge qubit”, *Phys. Rev. B* **69**, 180507-1–180507-4 (2004). *

Astafiev O., Pashkin Y., Nakamura Y., Yamamoto T., and Tsai J.: “Quantum noise in the Josephson charge qubit”, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 267007-1–267007-4 (2004). *

You J. Q., Nakamura Y., and Nori F.: “Fast two-bit operations in inductively coupled flux qubits”, *Phys. Rev. B* **71**, 024532-1–024532-9 (2005). *

口 頭 発 表 Oral Presentations

(国際会議等)

Tsai J. S.: “Josephson junction based quantum bit”, Symp. of 50th Founding Anniversary of the Korean Physical Society, (Hanyang University), Seoul, Korea, Oct. (2002).

Pashkin Y., Yamamoto T., Astafiev O., Nakamura Y., Averin D. V., and Tsai J. S.: “Quantum oscillations in two coupled charge qubits”, Int. Symp. on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), Atsugi, Mar. (2003).

Pashkin Y.: “Towards superconducting quantum gates”, Australian Institute of Physics/CISRO Public Lecture, West Lindfield, Australia, July (2003).

Pashkin Y., Yamamoto T., Astafiev O., Nakamura Y., Averin D. V., and Tsai J. S.: “Quantum oscillations in two coupled charge qubits”, Int. Superconducting Electronics Conf. (ISEC2003), Sydney, Australia, July (2003).

Pashkin Y., Yamamoto T., Astafiev O., Nakamura Y., Averin D. V., and Tsai J. S.: “Quantum oscillations in two coupled charge qubits”, 2003 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM 2003), (The Japan Society of Applied Physics), Tokyo, Sept. (2003).

Pashkin Y.: “Technological issues of charge qubits”, Quantum Technology 2004, Vancouver, Canada, Mar. (2004).

Tsai J.: “Coupled superconducting qubits”, 3rd Cross-Strait Workshop on Nano Science and Technology,

Hualien, Taiwan, Apr. (2004).

Pashkin Y., Astafiev O., Yamamoto T., Nakamura Y., Averin D. V., and Tsai J. S.: “Josephson solid-state qubits”, Scientific Session of the Russian Academy of Sciences Division of Physical Sciences, Moscow, Russia, Apr. (2004).

Tsai J.: “Coupled Josephson quantum bits”, SPIE’s 2nd Int. Symp. on Fluctuations and Noise, Noise and Information in Nanoelectronics, Sensors, and Standards II, Gran Canaria, Spain, May (2004).

Pashkin Y., Yamamoto T., Astafiev O., Averin D. V., Nakamura Y., Tilma T. E., Nori F., and Tsai J.: “Quantum coherence and entanglement of two coupled superconducting charge qubits”, 4th Int. Workshop on Macroscopic Quantum Coherence and Computing, (Regione Campania and Societa Italiana di Fisica, RIKEN, and others), Napoli, Italy, June (2004).

Yamamoto T., Pashkin Y., Astafiev O., Nakamura Y., and Tsai J.: “Conditional gate operation in superconducting charge qubits”, 4th Int. Workshop on Macroscopic Quantum Coherence and Computing, (Regione Campania and Societa Italiana di Fisica, RIKEN, and others), Napoli, Italy, June (2004).

Watanabe M.: “Small-capacitance SIS junctions fabricated by FIB etching”, IRC in Superconductivity Seminar, (University of Cambridge), Cambridge, UK, June (2004).

Tsai J.: “Recent progresses in superconducting qubits”, MIT Stanford UC Berkeley Nanotechnology Forum, Stanford, USA, June (2004).

Watanabe M.: “Fabrication and measurement of small-capacitance Nb Josephson junctions”, Nano Seminar, (Low Temperature Laboratory, Helsinki University of Technology), Espoo, Finland, June (2004).

Pashkin Y.: “Non-adiabatic state manipulation in single and coupled Josephson qubits”, Workshop on Quantum Systems out of Equilibrium, (International Centre for Theoretical Physics), Trieste, Italy, June (2004).

Tsai J., Astafiev O., Yamamoto T., Pashkin Y., and Nakamura Y.: “Recent progresses in superconducting qubit: single-shot readout and CNOT gate”, 2004 Taiwan Int. Conf. on Superconductivity & 7th Workshop on Low Temperature Physics, Penghu, Taiwan, July (2004).

Tsai J.: “Recent progresses in superconducting charge qubit”, KIAS-KAIST 2004 Workshop on Quantum Information Science, Seoul, Korea, Aug. (2004).

Tilma T. E., Pashkin Y., Astafiev O., Yamamoto T., Nakamura Y., Tsai J., and Nori F.: “Entanglement dynamics in two coupled charge qubits”, ERATO Conf. on Quantum Information Science 2004 (EQIS’04), Tokyo, Sept. (2004).

You J. Q., Nakamura Y., and Nori F.: “Fast two-bit operations in inductively coupled flux qubits”, ERATO Conf. on Quantum Information Science 2004 (EQIS’04), Tokyo, Sept. (2004).

- You J. Q., Tsai J., and Nori F.: “Scalable quantum computing with Josephson charge qubits”, ERATO Conf. on Quantum Information Science 2004 (EQIS’04), Tokyo, Sept. (2004).
- Astafiev O., Pashkin Y., Nakamura Y., Yamamoto T., and Tsai J.: “Energy relaxation of the Josephson charge qubit”, ERATO Conf. on Quantum Information Science 2004 (EQIS’04), Tokyo, Sept. (2004).
- Pashkin Y., Astafiev O., Yamamoto T., Nakamura Y., Averin D. V., Tilma T. E., Nori F., and Tsai J.: “Coherent dynamics of two coupled superconducting charge qubits”, Int. Symp. “Quantum Informatics - 2004”, Moscow, Russia, Oct. (2004).
- Pashkin Y., Astafiev O., Yamamoto T., Nakamura Y., Averin D. V., Tilma T. E., Nori F., and Tsai J.: “Coherent manipulation of coupled Josephson qubits”, 17th Int. Symp. on Superconductivity (ISS 2004), (ISTEC), Niigata, Nov. (2004).
- Tsai J.: “Recent progresses in superconducting charge qubit”, 1st Int. Symp. on Functionality of Organized Nanostructures (FON’04), Tsukuba, Nov.–Dec. (2004).
- Astafiev O.: “Recent results in experiments with Josephson qubits”, 1st Asia-Pacific Conf. on Quantum Information Science, Tainan, Taiwan, Dec. (2004).
- Pashkin Y., Astafiev O., Yamamoto T., Nakamura Y., Averin D. V., Tilma T. E., Nori F., and Tsai J.: “Solid-state Josephson charge qubits”, Joint Workshop on Superconductivity, Osaka, Dec. (2004).
- Tsai J.: “Recent progresses in Josephson junction qubits”, Int.l Conf. on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI2005), (NTT Basic Research Laboratories and Solution Oriented Research for Science and Technology (SORST),JST), Atsugi, Jan.–Feb. (2005).
- (国内会議)
- Pashkin Y., Tilma T., Averin D. V., Astafiev O., 山本剛, 中村泰信, Nori F., 蔡兆申: “Time evolution of entanglement in coupled Josephson junction qubits”, CREST 1st NANOFAB Workshop: Theoretical developments of Nanosuperconductors and its applications, 京都, 11 月 (2003).
- 蔡兆申, Pashkin Y., 山本剛, Astafiev O., 中村泰信, Averin D.: “超伝導量子ビットの近況”, 東京工業大学 21 世紀 COE プログラム「量子ナノ物理学」第 1 回公開シンポジウム, 東京, 3 月 (2004).
- 蔡兆申: “Recent progresses in superconducting charge qubit”, 第 23 回電子材料シンポジウム, 伊豆長岡, 7 月 (2004).
- 蔡兆申: “量子コンピュータ実現にむけて: 固体素子を用いた量子ビット論理演算回路の開発”, 先端技術ワークショップ, (日本原子力産業会議), 東京, 7 月 (2004).
- 蔡兆申: “ジョセフソン量子ビットの現状”, 平成 16 年電気学会電子・情報・システム部門大会, 宇都宮, 9 月 (2004).
- 蔡兆申: “ジョセフソン量子ビットの最新の進展”, 第 25 回表面科学セミナー「量子形状効果とナノ構造」, (日本表面科学会), 東京, 10 月 (2004).
- 渡部道生: “ナノスケール Nb 系ジョセフソン接合: 作製技術と電気伝導”, 第 10 回物理工学科教室談話会, (東京大学), 東京, 11 月 (2004).