

# 超伝導量子ビットとスピン集団のコヒーレント結合

さいとう しろう

齊藤 志郎 /Xiaobo Zhu

William John Munro

せんば こういち

仙場 浩一

NTT物性科学基礎研究所

人工的につくられる超伝導量子ビットは、制御性・拡張性に優れていますが、情報の保持時間が短いという問題があります。一方、自然界に存在するダイヤモンド結晶中のスピン集団は、逆の特性を持ちます。そこで本稿では、両者の長所を生かした超伝導・ダイヤモンド複合系における量子メモリの原理実験について解説します。

## 量子メモリの必要性

量子計算・量子情報処理の観点から、量子ビットの候補となり得る二準位系<sup>\*1</sup>における量子状態操作が注目を集めています。中でも超伝導量子ビットは、超伝導回路の設計自由度の高さから精力的に研究が進められています。単一量子ビットに関する研究では、1999年に初めてコヒーレント動作が確認された際、数nsであったコヒーレンス時間が<sup>(1)</sup>、現在では数10 $\mu$ sにまで伸びてきています<sup>(2)</sup>。また、複数量子ビットに関する研究も進み、精度の高い2量子ビットゲートや3量子ビットの状態制御が実現されています<sup>(3)</sup>。しかしながら、実用的な量子計算を行うには、より多くの量子ビットを含む系で、より長いコヒーレンス時間が必要となります。超伝導量子ビットは、制御性・拡張性の良さから演算機能が期待されていますが、コヒーレンス時間をどこまで延ばせるかは未知数です。

ここで、通常のコンピュータの構成要素を見てみましょう。中心部分は、数値計算や情報処理を行うCPU (Central Processing Unit: 中央演

算装置) と、情報を一定時間記憶するRAM (Random Access Memory) 等のメモリから構成されています。それぞれの機能に合った素子が役割分担をしているわけです (図1 (a))。一方、超伝導量子ビットでは、量子ビットそのものが、演算機能とメモリ機能の両方の役割を担っています (図1 (b))。そこでNTT研究所では、よりコヒーレンス時間の長いメモリ機能に適した系を量子メモリとして用い、超伝導量子ビットとの複合化を目指しました<sup>(4)</sup> (図2)。

## ダイヤモンドのNV中心

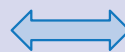
超伝導量子ビット用の量子メモリとして注目を集めているのは、ダイヤモンド結晶中のNV中心です。NV中心とは、ダイヤモンド格子中の炭素の置換位置に入った窒素 (N) と、それに隣接する炭素原子が抜けてできた空孔 (V) からなる複合不純物欠陥です (図3 (a))。NV中心はバンドギャップ中に存在する電子状態のために、ダイヤモンドにピンク色に近い色を生じさせる色中心です。特に、電子を1つ余分に有するNV<sup>-</sup>中心の電子状態は、大きさ1のスピンをもち、ゼロ磁場分裂

(a) 通常のコンピュータ

CPU: 演算装置 (半導体素子)



RAM: 記憶装置 (半導体素子)



(b) 超伝導を用いた量子コンピュータ

量子ビット: 演算装置+記憶装置 (超伝導素子)

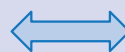
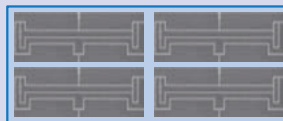


図1 コンピュータの構成要素

\*1 二準位系: 量子力学的な重ね合わせ状態が形成できる2つの準位を取り出したもの。

	制御性・拡張性	長寿命化 (コヒーレンス時間)
超伝導量子ビット	○ (回路設計の自由度が高い)	× (外部ノイズとの結合が強い)
ダイヤモンドNV中心	× (原子間の結合が弱い)	○ (外部ノイズから隔離している)

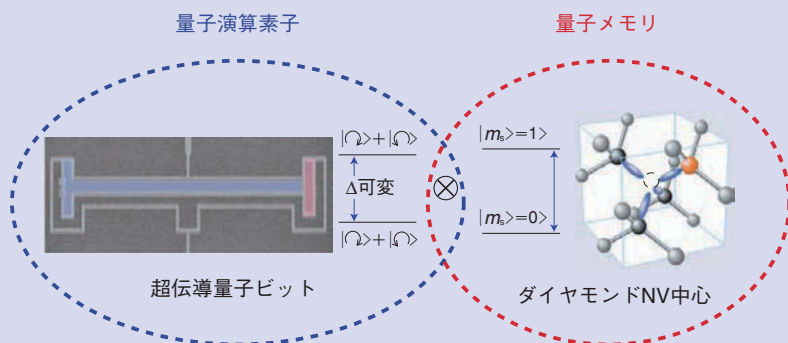


図2 超伝導・ダイヤモンド複合系

( $\infty$ ジョセフソンエネルギー $E_J$ ) が約  $\alpha=0.8$  倍になるように設計しています (図4 (a)). ループを貫く外部磁束  $\Phi_{ex}$  を  $(m+1/2)\Phi_0$  ( $m$ は整数,  $\Phi_0$ は磁束量子) 近傍にセットすると, 系は量子二準位系として振る舞います. 図4 (a) に  $\Phi_{ex}\approx 1.5\Phi_0$  での系のエネルギー準位を示します. 外部磁束  $\Phi_{ex}$  が  $1.5\Phi_0$  から離れると, 超伝導電流  $I_P\approx 300$  nA がループを右回りに流れる状態  $|R\rangle$  と左回りに流れる状態  $|L\rangle$  がエネルギー固有状態となります.  $\Phi_{ex}=1.5\Phi_0$  では, 接合の帯電エネルギーに起因するトンネル効果で,  $|L\rangle$  と  $|R\rangle$  の重ね合わせ状態がエネルギー固有状態となります. 磁束量子ビットの励起状態と基底状態のエネルギー差は,  $\Phi_{ex}=1.5\Phi_0$  で極小を示し, 外部からの磁場ノイズに対してもっとも安定化し, 量子ビットのコヒーレンス時間が最長となるため, この外部磁束は最適動作点と呼ばれています.

最適動作点でのエネルギー差  $\Delta$  は, 接合面積比  $\alpha$  によって決まり, 試料作製後に制御することはできません. そこで, 最適動作点で量子ビットを動作しつつ, 他の量子系 (例えばNV<sup>-</sup>中心等) が持つエネルギーと共鳴させるために, 最小接合をdc-SQUID (Superconducting QUantum Interference Device: 超伝導量子干渉計) で置き換えます (図4 (b)). すると, このSQUIDを貫く外部磁束  $\Phi_e$  によりSQUIDの  $E_J$  を実効的に制御することができ, ns未満での非常に高速な  $\Delta$  制御が可能となります<sup>(5)</sup>. コヒーレンスを保ちつつ, 制御性の良い磁束量子

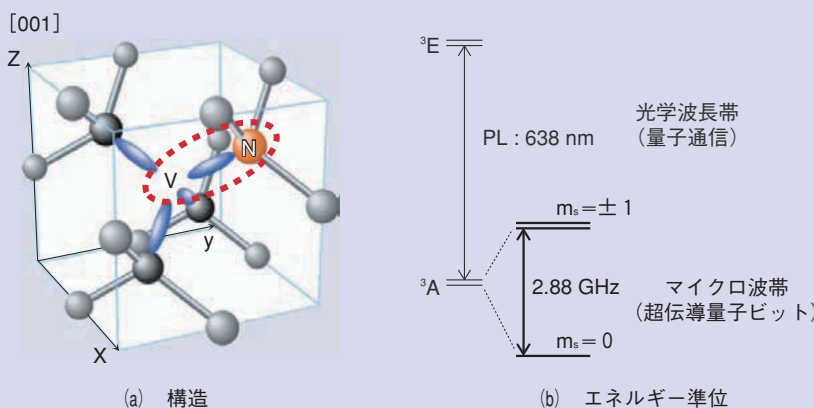


図3 ダイヤモンド結晶中のNV中心

により, 基底状態に2.88 GHzの分裂が存在します (図3 (b)). この電子スピンは, 室温で2 msのコヒーレンス時間を示すことが知られていて, 量子メモリとして有望です. また, 2.88 GHzのエネルギー分裂は, 超伝導量子ビットのエネルギースケールと一致していて, 両者間の量子情報の書き込み・読み出し動作に適しています. さらに, NV<sup>-</sup>中心の電子状態には, このマイクロ波帯の遷移に加えて, 光学波長帯の遷移も存在します (図3 (b)). 将来

は, 超伝導量子ビットで操作するマイクロ波帯の量子情報を光学波長帯へ変換し, 量子通信へと展開するための量子周波数変換素子への応用も期待できます.

### ギャップ可変型超伝導磁束量子ビット

超伝導磁束量子ビットは3つのジョセフソン接合<sup>\*2</sup>を含む超伝導 (アルミニウム) ループから構成されています. 3つの接合のうち1つだけを接合面積

\*2 ジョセフソン接合: 2つの超伝導体を極めて薄い絶縁膜を介して接触させた構造. ジョセフソン接合では超伝導電子対が絶縁膜を通過し, 電圧の発生なしに電流が流れます.

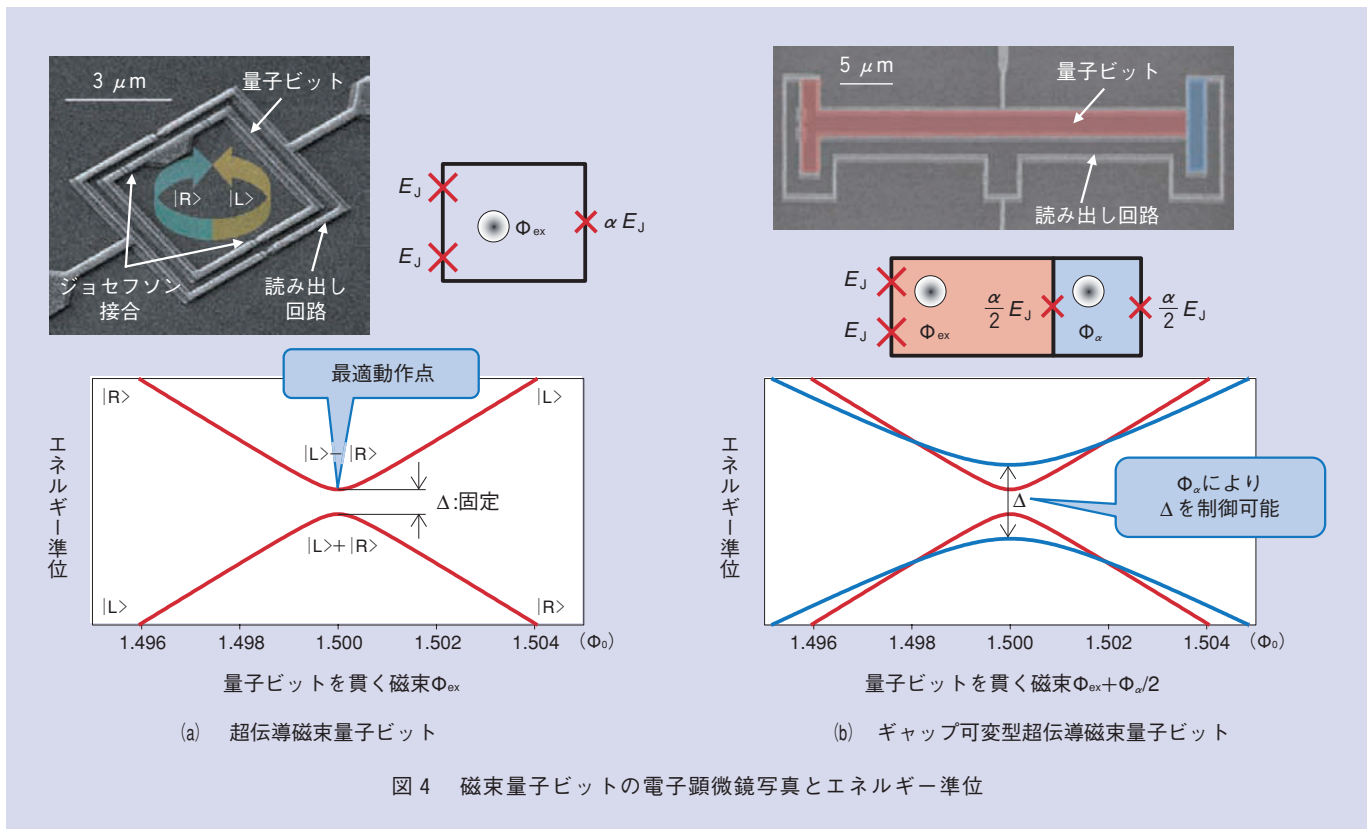


図4 磁束量子ビットの電子顕微鏡写真とエネルギー準位

ビットにおける、典型的な $\Delta$ の値は1～10 GHz程度で、ダイヤモンドのNV<sup>-</sup>中心との相性の良さが分かります。

### 超伝導・ダイヤモンド複合系

複合系におけるメモリ動作実現で重要となるのは、異なる2つの物理系間の結合強度の大きさです。なぜならば、メモリ動作に要する時間が結合強度の逆数で決まり、強結合が実現できれば、それだけ速いメモリ動作が可能になるからです。

磁束量子ビットとNV<sup>-</sup>中心の電子スピンとの結合強度は、量子ビットの超伝導電流 $I_p$ が作り出す磁場と電子スピンとの磁気的な結合で決まるため、強結合を達成するためには、両者間の距離を短くすることが重要です。さらに、複数の電子スピンは磁束量子ビットと協調的に結合するため、 $N$ 個の電

子スピンと結合すると、結合強度が $\sqrt{N}$ 倍になります。つまり、高密度のNV<sup>-</sup>中心を含むダイヤモンド結晶を準備することが重要になります。

本研究では、100 ppm近い窒素不純物を含む、高温高压（HPHT）合成ダイヤモンドに、炭素イオンを注入し、真空中でアニール<sup>\*3</sup>することにより高密度のNV<sup>-</sup>中心を形成しました。蛍光分光測定を用い、単一のNV<sup>-</sup>中心からの発光強度との比較から、NV<sup>-</sup>中心の密度は $1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ と見積もられました。

超伝導磁束量子ビットは、サファイア基板上に、電子線描画法、斜め蒸着法を用いて作製、この基板上にダイヤモンド結晶を貼り付けました。非常に単純な方法ですが、表面の清浄性を保ち、注意深く貼り付けることで、1 μm未満の基板間隔が実現可能と

なります。貼り合わせた試料の写真を図5に示します。実現されている空間配置にビオ・サバルの法則<sup>\*4</sup>を適用して見積もられる、単一の電子スピンと磁束量子ビットとの結合強度 $g_i$ は約8.8 kHzです。NV<sup>-</sup>中心の密度から協調的に結合している電子スピンの数を見積もり、電子スピン集団との結合強度 $g_{\text{ens0}}$ を求めると約50 MHzとなります。

### 分光測定

測定は希釈冷凍機を用い、ベース温度～12 mKで行いました。ダイヤモンド結晶を貼り付けた磁束量子ビット試料のマイクロ波による分光測定には、

\*3 アニール：一定温度に加熱して成形による歪を除去する方法。  
\*4 ビオ・サバルの法則：電流の存在によってその周りに生じる磁場を計算するための電磁気学における法則。

最適動作点近傍にエネルギー分裂が見られます (図 6 ①). 分裂の中心周波数 2.878 GHz は,  $NV^-$  中心のゼロ磁場分裂とよく一致しています. 一方, ダイヤモンド試料を貼り付ける前の分光測定では, 分裂は見られていません (図 6 ②). 以上の結果より, 観測された分裂は, 磁束量子ビットとダイヤモンド中の電子スピン集団との強結合による分裂であることが分かります. この分裂の大きさ  $g_{ens}=70$  MHz は, スピン集団との結合強度を表しますが,  $NV^-$  中心の密度から見積もった結合強度  $g_{ens0}$  とよく一致しています.

### 時間領域測定

磁束量子ビットから電子スピン集団への量子情報の書き込み・読み出し動作を実証するために, 図 7 に示す手法を用い時間領域の実験を行いました. まず,  $\Phi_{ex}$  を制御し, 量子ビットとスピン集団が十分離調している状態でマイクロ波パルスを照射し, 量子ビットのみを励起状態に準備します (図 7 ①). 次に, すばやく  $\Phi_{ex}$  を制御し, 量子ビットとスピン集団を共鳴させます (図 7 ②). このとき,  $\Phi_{ex}$  の変化が結合強度  $g_{ens}$  に比べて十分に速いと, 非断熱的遷移が起こり, 量子ビットとスピン集団間で, 以下のように量子 1 個分のエネルギーの授受を示す, 量子もつれ振動 (周波数  $g_{ens}$ ) が生じます (図 7 ③).

$$|1\rangle_{qb}|0\rangle_{ens} \Leftrightarrow |0\rangle_{qb}|1\rangle_{ens}$$

ここで, 添え字の qb, ens は, それぞれ量子ビット, スピン集団を表し, 0, 1 は, 基底状態と励起状態を表します.

最後に, 再び量子ビットとスピン集

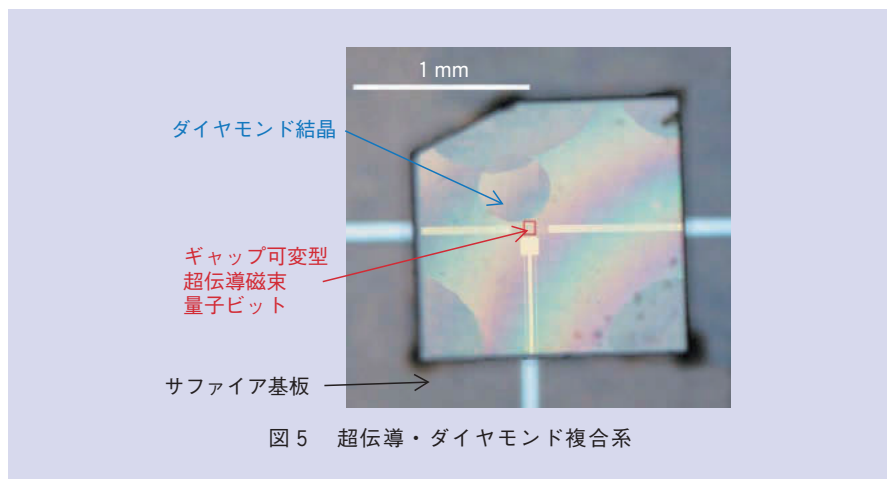


図 5 超伝導・ダイヤモンド複合系

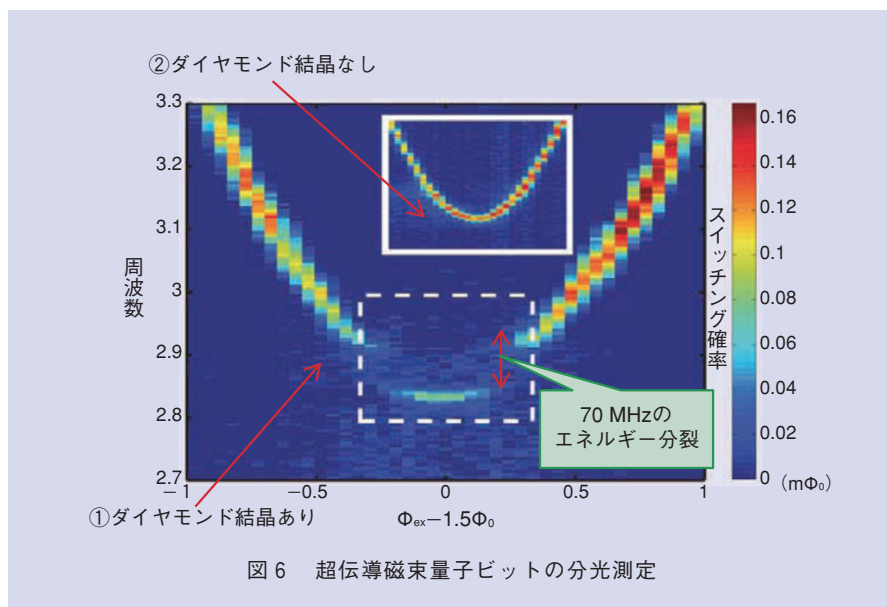


図 6 超伝導磁束量子ビットの分光測定

団を非断熱的に離調し (図 7 ④), 読み出し回路を用いて量子ビットの状態を測定します (図 7 ⑤).

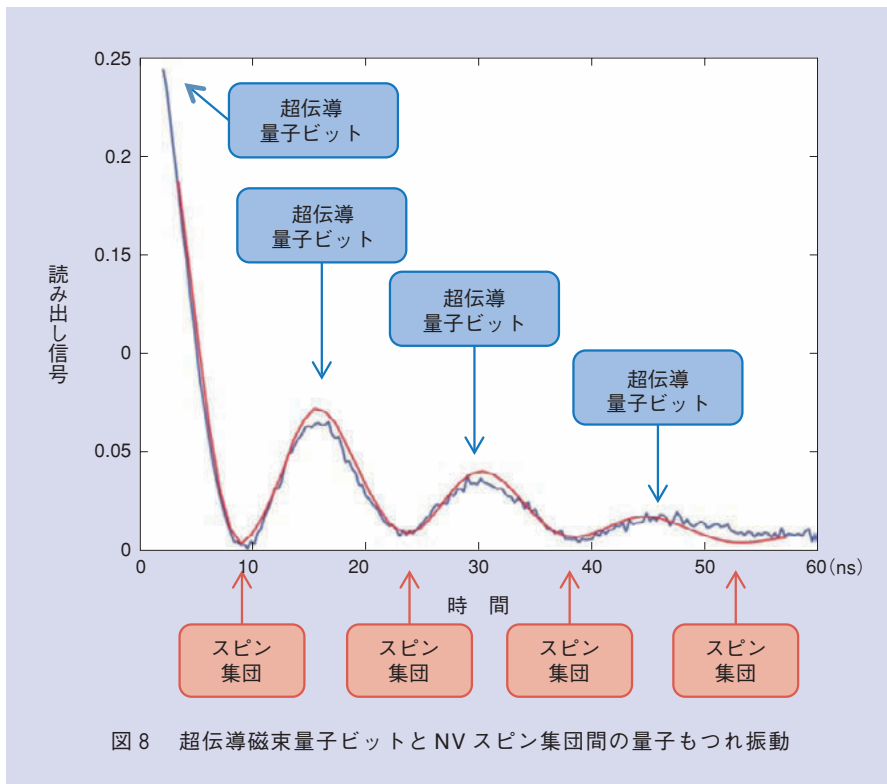
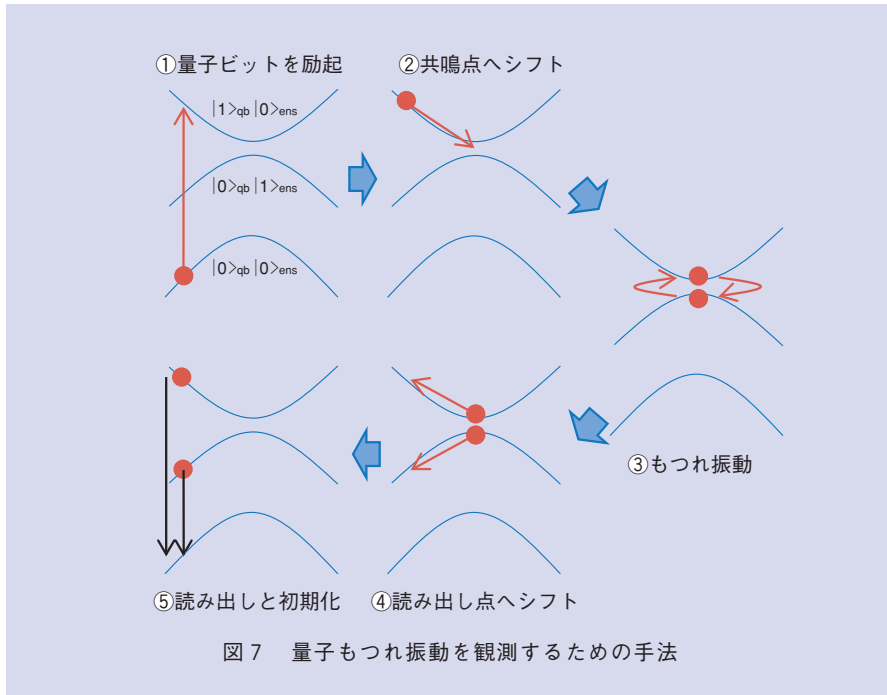
図 8 に量子もつれ振動の測定結果を示します. この振動が, まさに量子ビットから電子スピン集団への量子情報の書き込み・読み出し動作の繰り返しを表しており, 異なる物理系の間での量子メモリ動作を実証しています.

### 今後の課題

量子ビットのコヒーレンス時間は 150 ns 程度あるのに対し, 図 8 に示したも

つれ振動は 40 ns 程度で減衰しています. これは予想に反してダイヤモンド結晶中の電子スピン集団のコヒーレンス時間が短いことを示唆しています. 現段階では, 100 ppm 近く含まれている窒素不純物の持つ電子スピンの揺らぎが,  $NV^-$  中心の電子スピンのコヒーレンス時間を短くしている可能性が高いと考えています. 今後は窒素不純物濃度を減らし, ダイヤモンド結晶の質を向上することが課題となります.

将来は長寿命化した量子メモリを有する超伝導量子ビットを多ビット化し,



そこでの量子計算が期待されます。また、超伝導に基づく量子情報処理と光による量子通信を結ぶ、量子周波数変換素子への応用も期待できます。

■参考文献

- (1) Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, and J. S. Tsai: "Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box," Nature, Vol.398, No.6730, pp.786-788, 1999.
- (2) H. Paik, D. I. Schuster, L. S. Bishop, G.

- Kirchmair, G. Catelani, A. P. Sears, B. R. Johnson, M. J. Reagor, L. Frunzio, L. Glazman, S. M. Girvin, M. H. Devoret, and R. J. Schoelkopf: "Observation of High Coherence in Josephson Junction Qubits Measured in a Three-Dimensional Circuit QED Architecture," Phys. Rev. Lett., Vol.107, No.24, 240501, 2011.
- (3) M. D. Reed, L. DiCarlo, S. E. Nigg, L. Sun, L. Frunzio, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf: "Realization of three-qubit quantum error correction with superconducting circuits," Nature, Vol.482, No.7385, pp.382-385, 2012.
- (4) X. Zhu, S. Saito, A. Kemp, K. Kakuyanagi, S. Karimoto, H. Nakano, W. J. Munro, Y. Tokura, M. S. Everitt, K. Nemoto, M. Kasu, N. Mizuochi, and K. Semba: "Coherent coupling of a superconducting flux qubit to an electron spin ensemble in diamond," Nature, Vol.478, No.7368, pp.221-224, 2011.
- (5) X. Zhu, A. Kemp, S. Saito, and K. Semba: "Coherent operation of a gap-tunable flux qubit," Appl. Phys. Lett., Vol.97, No.10, 102503, 2010.



(左から) William John Munro / 仙場 浩一 / Xiaobo Zhu / 齊藤 志郎

超伝導を用いた量子情報処理を目指して研究に取り組んでいます。この研究分野は、ここ10年で飛躍的に進みました。系の複合化によってさらなる進展が期待できる面白い段階に入ってきていると思います。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所  
量子電子物性研究部  
TEL 046-240-3327  
FAX 046-240-4722  
E-mail saito.shiro@lab.ntt.co.jp