

仙場 浩一

情報通信研究機構
上席研究員

超伝導量子メタマテリアルの創成と制御

§ 1. 研究成果の概要

本研究計画は、「深強結合」等の未踏領域の物理現象や新種のハイブリッド量子系を積極的に使い、新奇な量子的機能を有する 超伝導量子メタマテリアル(一般化された分子 および量子デバイス複合体)の創成とその制御を目指すものである。

今年度は 以下の研究項目において進展が得られた:

- ① 量子極限増幅変調技術の研究：超強結合状態にある 超伝導量子ビット・共振回路系にポンプ-プローブ分光法を応用して量子状態占有率の測定方法を確立した。この方法を用いることで超(深)強結合系に非常に大きな光シフトが生じる場合にもスペクトロスコーピーやダイナミクスの研究が可能となった。
- ② 高コヒーレンス窒化物超伝導薄膜技術の開発 (Si 基板上 窒化物超伝導体マイクロ波共振器-超伝導人工原子 量子融合素子の開発)：今年度は水素終端 Si 基板上の窒化物超伝導体(TiN)において、低カイネティックインダクタンスかつ単一光子レベルで 10^6 に迫る内部 Q 値の超伝導共振器を作製する成膜条件を見出した。

- ③ π 接合を含む超伝導量子融合素子の開発: 本研究では、図に示すように (1) Si 基板上に TiN バッファ層を用いたフルエピタキシャル成長法により作製した NbN/AlN/NbN 接合の磁束量子ビット (0-qubit) および (2) 同じ構造に NbN/CuNi/NbN の π シフターを取り入れた磁束量子ビット (π -qubit) の 2 種類を用意し、各量子ビットの特性を調べた。読み出しには、量子ビットと強結合した NbN 製の 2 次元コプレーナ導波路共振器を用いた。20 mK におけるマイクロ波伝送特性を測定した結果、0 磁場付近に sweet spot をもつ π -qubit と、半磁束量子相当の磁場で sweet spot をもつ 0-qubit のマイクロ波遷移スペクトルを確認した。

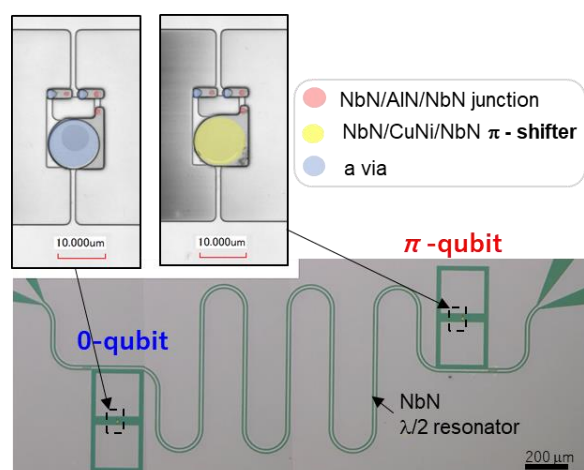


図 NbN コプレーナ共振器と強結合した二種類の超伝導磁束量子ビット (0-qubit, π -qubit)

- ④ 深強結合回路 QED 技術の研究 : これまで取り組んできた LC 共振器中の単一モード電磁場と超(深)強結合した量子ビット系の研究は、伝統あるレビュー論文誌 Rev. Mod. Phys. 91, 025005 (2019) や Nature Rev. Phys. 1, 19 (2019) で大きく取り上げられ紹介された。この単一モード電磁場との超(深)強結合から一歩進めて、コプレーナ共振器中の多モード電磁場と超(深)強結合した磁束量子ビット系での実験を進めたところ、磁束バイアスエネルギー $\varepsilon = 0$ 付近での透過型分光測定において遷移信号の消失を観測した。これは、コプレーナ共振器の3つのモードそれぞれと磁束量子ビットとの間に、LC 共振器を用いた場合と同程度の(分布定数回路における超(深)強結合強度の新記録に相当する)非常に強い結合が実現している可能性を示している。また、複数量子ビット・共振器 超強結合系における実験に関し、超放射量子相転移をスペクトル測定から判別する新たな方法に関する理論研究が進展した。この成果に関しては、Phys. Rev. A 誌で公表した [1]。
- ⑤ 超伝導量子メタマテリアルの量子光学応答理論 : 深強結合系のマイクロ波応答理論は、これまでに Phys. Rev. A 84, 043832 (2011) 等の先行研究があったが、解析に不備があり、深強結合系に適用できないことが分かっている。本研究では、変分法及び厳密対角化に基づいて、量子ビットと共振器からなる深強結合系と導波路が結合した全系の基底状態を解析的・数値的に求めた。得られた状態が孤立した深強結合系の基底状態とどの程度異なるか

を, 励起状態の割合・仮想光子数・状態の量子性の観点から評価した. 共振器-導波路間の結合及び共振器-量子ビット間の結合方法(容量性/誘導性)が同じか異なるかによって振る舞いが大きく異なり, 両者の結合方法が異なる場合は同じ場合に比べて導波路の影響が著しく小さいことが判明した.

【代表的な原著論文】

- [1] S. Ashhab, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, S. Saito, F. Yoshihara, T. Fuse, K. Semba, 'Spectrum of the Dicke model in a superconducting qubit-oscillator system', Phys. Rev. A **99**, 063822 (2019).

§ 2. 研究実施体制

(1) NICT グループ

研究代表者: 仙場浩一 (情報通信研究機構未来 ICT 研究所 上席研究員/大阪大学大学院基礎工学研究科 招へい教授/大阪大学先導的学際研究機構量子情報・量子生命研究部門 招へい教授兼任)

共同研究者: 寺井弘高 (情報通信研究機構・未来 ICT 研究所 上席研究員, ②③), 山下太郎 (名古屋大学大学院工学研究科 准教授, ②③), 吉原文樹 (情報通信研究機構未来 ICT 研究所 主任研究員, ①④), 布施智子 (情報通信研究機構未来 ICT 研究所 主任研究員, ①②④), 金 鮮美 (情報通信研究機構未来 ICT 研究所 研究員, ②③), 丘偉 (情報通信研究機構未来 ICT 研究所 主任研究員, ②③), アオ ズチャオ (情報通信研究機構未来 ICT 研究所・協力研究員, ④),

共同研究者(海外): Sahel Ashhab (Senior Scientist, Qatar Environment and Energy Research Institute, Hamad Bin Khalifa University, Qatar Foundation, ①④⑤), William D. Oliver (Professor, Massachusetts Institute of Technology Physics Department, MIT Lincoln Laboratory, ①④)

研究項目 : 超伝導量子メタマテリアルの創成とそのコヒーレント制御を目的とした

- ①量子極限増幅変調技術の研究
- ②高コヒーレンス窒化物超伝導薄膜技術の開発
- ③ π 接合を含む超伝導量子融合素子の開発
- ④深強結合回路 QED 技術の研究

(2) 東京医科歯科大グループ

主たる共同研究者: 越野和樹 (東京医科歯科大学・教養部・准教授, ①④⑤)

共同研究者: 設楽智洋 (東京医科歯科大学・教養部・特任助教, ⑤)

研究項目

- ⑤超伝導量子メタマテリアルの量子光学応答理論