

量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出  
2017年度採択研究代表者

2021年度  
年次報告書

仙場 浩一

情報通信研究機構 未来 ICT 研究所  
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」など未踏領域の物理現象やハイブリッド量子系を駆使し、革新的な機能を有する超伝導量子メタマテリアル(一般化された分子や量子デバイス集合体)の創成とそのコヒーレント制御を目指し、次の5つの研究技術開発を掲げ研究を進めてきた。[1] ジョセフソン量子極限増幅、[2] 窒化物超伝導薄膜技術、[3]  $\pi$  接合超伝導量子回路、[4] 深強結合回路QED、[5] 量子光学的理論手法の応用。

今年度までに項目[1]~[3]で進めて来たシリコン基板上への窒化物超伝導薄膜を用いたエピタキシャル・ジョセフソン接合を含む量子回路作製技術が計画以上に進展し、革新的な量子ビットを実現できる見通しが立った。今期、実験グループリソースの大部分を新型超伝導磁束量子ビットの開発に集中させ、シリコン基板上のエピタキシャル成長を用いた窒化物超伝導磁束量子ビットの開発に世界で初めて成功した。従来製法による窒化物超伝導体量子ビットのコヒーレンス特性を桁違いに更新する結果が得られた。[4] 深強結合回路QEDの研究では深強結合まで有効な磁束量子ビット・共振回路結合系の正準ハミルトニアン導出に成功した。同時に低エネルギー近似のラビ・ハミルトニアン各項との対応関係も明らかとなった。これらの知見は広いエネルギー領域に亘り結合系を的確に記述することができるため、多様な量子回路を扱う際に重要である。[5] 量子光学的理論手法の超伝導量子メタマテリアルへの応用では、超強結合共振器 QED 系を用いた決定論的な三光子下方変換について理論的な成果が得られた。超~深強結合共振器 QED 系では、相互作用の反回転項に由来する、励起数を保存しない新奇量子現象の発現が期待されている。本研究では一つの原子が共振器の基本モードおよび3次高調波モードの双方に非常に強く結合している系について、周波数  $\omega_3$  の単一光子が周波数  $\omega_1$  の三光子へと変換される「三光子下方変換」が決定論的に起こり得ることを理論的に発見し、その条件を明らかにした。

## § 2. 研究実施体制

### (1) 仙場グループ

①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)

②研究項目

- [1] ジョセフソン量子極限増幅の研究
- [2] 窒化物超伝導薄膜技術の研究
- [3]  $\pi$  接合超伝導量子回路の研究
- [4] 深強結合回路 QED の研究

### (2) 越野グループ

①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)

②研究項目

- [5] 量子光学的理論手法の応用研究

### 【代表的な原著論文情報】

- 1) “Enhanced-coherence all-nitride superconducting qubit epitaxially grown on Si Substrate”, Sunmi Kim, Hiroataka Terai, Taro Yamashita, Wei Qiu, Tomoko Fuse, Fumiki Yoshihara, Sahel Ashhab, Kunihiro Inomata, Kouichi Semba, Communications Materials volume **2**, Article number: 98 (2021).
- 2) “Nonclassicality of open circuit QED systems in the deep-strong coupling regime”, Tomohiro Shitara, Motoaki Bamba, Fumiki Yoshihara, Tomoko Fuse, Sahel Ashhab, Kouichi Semba and Kazuki Koshino, New Journal of Physics, Volume **23**, October 2021.
- 3) “Deterministic three-photon down-conversion by a passive ultrastrong cavity-QED system”, Kazuki Koshino, Tomohiro Shitara, Ziqiao Ao, and Kouichi Semba, Phys. Rev. Research **4**, 013013 (2022).
- 4) “Hamiltonian of a flux qubit-LC oscillator circuit in the deep-strong-coupling regime”, F. Yoshihara, S. Ashhab, T. Fuse, M. Bamba, and K. Semba, Scientific Reports volume **12**, Article number: 6764 (2022).