

## 超伝導回路を用いたパラメトリック増幅器・発振器と その量子情報処理への応用

### Josephson parametric amplifiers and phase-locked oscillators and their application to quantum information processing

日本電気スマエネ研<sup>1</sup>, 理研創発センター<sup>2</sup>, 東京医科歯科大<sup>3</sup>, 東大先端研<sup>4</sup>

○山本 剛<sup>1,2</sup>, 林志栄<sup>2</sup>, 猪股 邦宏<sup>2</sup>, 越野 和樹<sup>3</sup>, 中村 泰信<sup>2,4</sup>, 蔡 兆申<sup>2</sup>

NEC Corp.<sup>1</sup>, RIKEN<sup>2</sup>, Tokyo Medical and Dental Univ.<sup>3</sup>, The Univ. of Tokyo<sup>4</sup>

○Tsuyoshi Yamamoto<sup>1,2</sup>, Zhirong Lin<sup>2</sup>, Kunihiro Inomata<sup>2</sup>, Kazuki Koshino<sup>3</sup>,

Yasunobu Nakamura<sup>2,4</sup>, Jaw-Shen Tsai<sup>2</sup>

E-mail: t-yamamoto@fe.jp.nec.com

優れた雑音特性を持つ増幅器は、それが必要でない例を探すのが困難なほど、実験物理の様々な場面で用いられている。しかし量子限界の雑音特性を持つ増幅器が必要不可欠な応用例はそれほど多くはないであろう。超伝導回路を用いたパラメトリック増幅器の歴史は古く、1960年代から盛んに研究され、1990年には真空ノイズのスクイーミングも実証された [1]。当時は重力波検出などいくつかの応用が考えられていたが、喫緊の必要性がなかったためか、その後超伝導パラメトリック増幅器が実用デバイスとして広く用いられることはなかった。しかし2000年代になると超伝導回路を用いた量子情報処理研究の盛り上がりによりこの状況は一変する。現在、超伝導量子ビットの読み出し方法として最も広く用いられている分散読み出しと呼ばれる手法においては、量子ビットと結合した共振器から放出される微弱なマイクロ波を、量子ビットの寿命よりも十分短い時間内に検波することが要求される。当初これには半導体を用いた冷却型増幅器が用いられていたが、市販品の最高性能のものを用いても単一試行で高精度の読み出しを行うには信号雑音比が不十分であった。この問題を解決するために超伝導パラメトリック増幅器が再び注目を集めた。2009年に標準量子限界を打破する雑音性能が報告されると [2]、量子ビットの読出し [3] のみならず、微小機械振動子の位置検出 [4] やマイクロ波領域における量子光学実験のスクィーズド光源 [5] など様々な実験に応用され、現在超伝導パラメトリック増幅器は、マイクロ波を扱う超伝導回路実験における標準的なツールとしての地位を築きつつある。本講演ではこのような経緯を踏まえつつ、筆者らのグループで開発した超伝導パラメトリック増幅器 [6] とその応用実験 [7,8,9,10] について紹介する。

また一般にパラメトリック増幅器は、閾値以上の強度でポンプすると発振器として動作する（パラメトリック発振）。この発振には、振幅が同じで位相が互いに $\pi$ 異なる2つの状態が存在するが、どちらの状態が実現するかは、発振器に入力する信号の強度と位相に依存する。これは1950年代に開発されたパラメトロン素子の動作原理に他ならない。最近筆者らは、このパラメトロンの超伝導版というべきデバイスを用いて、量子ビットの高精度、非破壊読出しを実現した [11]。その結果についても紹介する。

[1] R. Movshovich *et al.*, PRL **65** 1419 (1990). [2] M. A. Castellanos-Beltran *et al.*, Nature Phys. **4** 928 (2008). [3] R. Vijay *et al.*, PRL **106** 110502 (2011). [4] J. D. Teufel *et al.*, Nature Nanotech. **4** 820 (2009). [5] F. Mallet *et al.*, PRL **106** 220502 (2011). [6] T. Yamamoto *et al.*, APL **93** 042510 (2008). [7] Z. R. Lin *et al.*, APL **103** 132602 (2013). [8] E. P. Menzel *et al.*, PRL **109** 250502 (2012). [9] L. Zhong *et al.*, New J. Phys. **15** 125013 (2013). [10] K. Inomata *et al.*, arXiv:1405.5592. [11] Z. R. Lin *et al.*, submitted.