2020 年度　修士論文

超伝導準集中定数共振器間における
高強度可変結合素子の研究開発

2020 年 12 月 25 日

東京理科大学大学院 理学研究科物理学専攻　蔡研究室
（学籍番号 1219537）

宮永　崇史

東京理科大学大学院 理学研究科物理学専攻

序章

超伝導体を用いた擬似人工原子システムの確立 [1] から約 23 年を経た現在、超伝導量子計算機の開発に注目が集まっている。量子計算機が古典コンピュータと比較して有意な結果を発揮するためには約 100 万もの擬似人口原子（以下量子ビット）を集積してからだといわれており、回路の集積度は年々増加している。回路に装填される素子は量子ビットだけではない。量子情報を取得する読み出し素子。量子ビット同士を相互作用させる結合素子。量子情報を伝送させる伝送ライン。これら素子群をパッケージングする回路デザインも量子ビットの集積度に大きく寄与する。当研究室でも万能型量子計算機、専門特化型量子計算機の回路アーキテクチャをそれぞれ提案しており、2 次元平面状で実装可能であることが利点である。

目次

第 1 章

目的

研究の目的

1.1 結合回路

[2]

1.2 超伝導回路の大規模化

1.3 結合振動子

第 2 章

原理

超伝導回路の紹介と結合素子の物理モデルの導入

2.1 物理モデル

2.2 超伝導回路素子

2.2.1 超伝導共振器

超伝導分布定数回路

超伝導準集中定数回路

2.2.2 ジョセフソン接合

2.2.3 rf-SQUID

2.2.4 dc-SQUID

2.2.5 カイネティックインダクタンス

2.2.6 ミアンダインダクタンス

第 3 章

実装

結合素子の設計手法と作成方法を紹介。測定に使用したサンプルについても言及

3.1　設計

3.1.1　遷移スペクトル計算

3.1.2　メインループによる変調

3.1.3　β ループによる変調

3.1.4　回路デザイン

3.1.5　電磁界シミュレーション

3.2　製造

3.2.1　製造パラメータ

3.2.2　二重角度蒸着

3.3　測定サンプル

3.3.1　回路パラメータ

第 4 章

測定

測定環境の説明。希釈冷凍機、使用した実験機器など

4.1　解析手法

4.1.1　クロストーク

4.2　測定環境

第 5 章

結果

測定結果など

5.1　周波数領域測定

5.1.1　セットアップ

5.2　時間領域測定

5.2.1　セットアップ

第 6 章

考察

解析手法の説明と測定結果からいえる結合性能について言及

6.1 結合性能

6.2 結合振動子の物理

第 7 章

結論

結合素子として使えるのかどうか総論

7.1　解析を終えて

第 8 章

展望

今後改善可能性のある部分について言及

8.1 今後の展望

第 9 章

謝辞

謝辞

謝辞

第 10 章

補足

本文に直接記載すると煩雑になりがちだが重要な計算をここに記す。

10.1 ハミルトニアンの基底変換

ここでは、Hamiltonian の変換を行う。

$$\hat{\mathcal{H}} = \hbar \left(\hat{a}^\dagger \ \hat{b}^\dagger\right) \begin{pmatrix} \tilde{\omega}_a & g(\Phi) \\ g(\Phi) & \hat{\omega}_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{pmatrix} \tag{10.1}$$

$$= \hbar\hat{\omega}_a \hat{a}^\dagger \hat{a} + \hbar\hat{\omega}_b \hat{b}^\dagger \hat{b} + \hbar g(\Phi) \left(\hat{a}^\dagger \hat{b} + \hat{a}\vec{\hat{b}}^{+}\right) \tag{10.2}$$

$$\hat{c}_\pm = \frac{\hat{a} \pm \hat{b}}{\sqrt{2}} \quad \hat{c}_+^\dagger = \frac{\hat{a}^\dagger \pm \hat{b}^\dagger}{\sqrt{2}} \tag{10.3}$$

$$\hat{a}^\dagger = \frac{\hat{c}_+^\dagger + \hat{c}_-^\dagger}{\sqrt{2}} \quad \hat{b} = \frac{\hat{c}_+^\dagger - \hat{c}_-^\dagger}{\sqrt{2}} \tag{10.4}$$

$$\hat{a} = \frac{\hat{c}_+ + \hat{c}}{\sqrt{2}} \quad \hat{b} = \frac{\hat{c}_+ - \hat{c}_-}{\sqrt{2}} \tag{10.5}$$

$$\hat{a}^\dagger \hat{a} = \frac{1}{2} \left(\hat{c}_+^\dagger + \hat{c}_-^+\right) \left(\hat{c}_t + \hat{c}_-\right) \quad \hat{a}^\dagger \hat{b} = \frac{1}{2} \left(\hat{c}_t^+ + \hat{c}_-^+\right) \left(\hat{c}_+ - \hat{c}_-\right) \tag{10.6}$$

$$\hat{b}\hat{b} = \frac{1}{2} \left(\hat{c}_t + \hat{c}_-^+\right) \left(\hat{c}_+ - \hat{c}_-\right) \quad \hat{a}\hat{b}^\dagger - \frac{1}{2} \left(\hat{c}_t + \hat{c}_-\right) \left(\hat{c}_t^+ - \hat{c}_-^+\right) \tag{10.7}$$

$$\hat{a}^\dagger \hat{a} = \frac{1}{2} \left[\hat{c}_t^+ \hat{c}_+ + \hat{c}_t^+ \hat{c} + \hat{c}_-^+ \hat{c}_t + \hat{c}_-^+ \hat{c}_-\right] \tag{10.8}$$

$$\hat{b}^\dagger \hat{b} = \frac{1}{2} \left[\hat{c}_t^* \hat{c}_t - \hat{c}_t^n \hat{c} - \hat{c}_-^+ \hat{c}_t + \hat{c}_-^+ \hat{c} -\right] \tag{10.9}$$

$$\hat{a}^\dagger \hat{b} = \frac{1}{2} \left[\dot{c} + \hat{c}_t - \hat{c}_t \hat{c}_- + \hat{c}_-^+ \hat{c}_t - \hat{c}'_- \hat{c}_-\right] \tag{10.10}$$

$$\hat{a}\hat{b}^{\dagger} = \frac{1}{2}\left[\hat{c}_{+}\hat{c}_{+}^{4} - \hat{c}_{+}\hat{c} \pm +\hat{c} - \hat{c}_{+}^{2} - \hat{c} - \hat{c}_{-}\right] \tag{10.11}$$

$$\hat{H} = \frac{\hbar}{2}\hat{w}_{a}\left[\hat{c}_{t}^{+}\hat{c}_{+} + \hat{c}_{t}^{+}\hat{c} + \hat{c}_{-}^{+}\hat{c}_{t} + \hat{c}_{-}^{+}\hat{c}_{-}\right] \tag{10.12}$$

$$+\frac{\hbar}{2}\hat{\omega}_{b}\left[\hat{c}_{+}^{+}\hat{c}_{+} - \hat{c}_{+}^{+}\hat{c}_{-} - \hat{c}_{-}^{+}\hat{c}_{+} + \hat{c}_{-}^{+}\hat{c}_{-}\right] \tag{10.13}$$

$$+\frac{\hbar}{2}g\left[2\hat{c} + \hat{c}_{+} - 2\hat{c}_{-}\hat{c}\right] \tag{10.14}$$

$$\hat{H} = \frac{\hbar}{2}\left(\hat{\omega}_{a} + \hat{\omega}_{b} + 2g(\Phi)\right)\hat{c}_{t}^{+}\hat{c}_{+} + \frac{\hbar}{2}\left(\hat{w}a + \hat{w}_{b} - 2g(\Phi)\right)\hat{c}_{-}^{+}\hat{c}_{-} \tag{10.15}$$

$$+\frac{\hbar}{2}A\left(\hat{w}_{a} - \hat{w}_{b}\right)\left(\hat{c}_{t} + \hat{c}_{-} + \hat{c}_{+}\hat{c}_{-}\right) \tag{10.16}$$

$$\omega_{a} + \bar{c}_{b} + 2g(\Phi) = \Omega + \tag{10.17}$$

$$\omega_{a} + \bar{c}_{b} - 2g(\Phi) = \Omega - \tag{10.18}$$

$$\hat{\omega}_{a} - \hat{w}_{b} = \Delta \tag{10.19}$$

$$\hat{H} = \frac{\hbar}{2}\Omega + \hat{c} + \hat{c} + \frac{\hbar}{2}\Omega - \hat{c} \pm \hat{c} + \frac{\hbar}{2}\Delta\left(\hat{c} + \hat{c} + \hat{c}_{+}\hat{c}_{-}^{+}\right) \tag{10.20}$$

$$-\frac{\hbar}{2}\begin{pmatrix} \hat{c}_{+} & \hat{c}\pm \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \Omega_{1} & \Delta \\ 2 & \Omega_{2} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \hat{c}_{+} \\ \hat{c}_{-} \end{pmatrix} \tag{10.21}$$

10.2　ミアンダインダクタンス

10.3　rf-SQUID の相互インダクタンス

dc-SQUID のインダクタンスは

$$L_{s}(\Phi) = \frac{\Phi_{0}}{4\pi I_{c}|\cos(\phi_{-}^{min}(\Phi_{ext}))|} \tag{10.22}$$

と記述することができる。

$$\Phi = \Phi_{ext} + L_{loop} \tag{10.23}$$

$$\beta_{dc} = \frac{2\pi L_{loop}I_{c}}{\Phi_{0}} \tag{10.24}$$

とすると。

10.4　マスター方程式

10.5　2 点相関関数

参考文献

[1] Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, and J. Tsai, "Coherent control of macroscopic quantum states in a single-cooper-pair box", nature **398**, 786 (1999).

[2] A. Baust, E. Hoffmann, M. Haeberlein, M. J. Schwarz, P. Eder, J. Goetz, F. Wulschner, E. Xie, L. Zhong, F. Quijandría, B. Peropadre, D. Zueco, J. J. García Ripoll, E. Solano, K. Fedorov, E. P. Menzel, F. Deppe, A. Marx, and R. Gross, "Tunable and switchable coupling between two superconducting resonators", Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics **91**, 1 (2015).