

論文内容の要旨

論文題目 半導体量子ドット-超伝導共振器結合系による Circuit QED の研究

氏名 樋田 啓

本研究は、半導体量子ドットによる 2 準位系と超伝導共振器による電磁場の相互作用を調べた実験による研究である [1]。2 準位系と電磁場との相互作用は、これまで主に天然原子を使った Cavity QED (Quantum Electrodynamics) の実験 [2] や、超伝導量子ビットを使った Circuit QED の実験 [3] により調べられてきた。超伝導量子ビットを用いた系では複数の量子ビットを組み合わせた量子プロセッサなど、量子情報処理を目指したデバイスの実現も報告されている。このような系を半導体量子ドットを使って実現できれば、半導体プロセス技術を使った大規模化や、スピン自由度を利用した 2 準位系 (=スピン量子ビット) を含む様々な系への拡張などの点で、さまざまな利点があると考えられる。また、本研究で用いる超伝導共振器は同種または異種の量子ビットをつなぐ「配線」に相当する「量子バス」としてもはたらく。量子バスを使って異なる量子系を組み合わせることで、相反する要素である制御性とコヒーレンス時間を兼ね備えた「ハイブリッド量子系」を実現することもできる。したがって、半導体量子ドットと超伝導共振器の結合が実現できれば、半導体系を含む大規模なハイブリッド量子素子開発への道も開かれる。

2 準位系と電磁場を組み合わせた系で顕著な量子効果が現れる実験を行うためには、両者の結合、すなわち 2 準位系と電磁場がエネルギーをやりとすレートが系全体のデコヒーレンスレートを上回らないとならない。結合が系のデコヒーレンスより小さい場合、両者が光子を介して相互作用する前に系の状態が乱されてしまい、量子的な効果の観測は期待できない。本研究では、量子ドットと共振器の結合の強さ g と量子ドットおよび共振器のデコヒーレンスレート γ, κ を実験により調べ、デコヒーレンスの原因について考察も行った。

図 1 に作製した試料の光学・電子顕微鏡写真を示す。(a) は試料の断面図、(b) は全体像である。

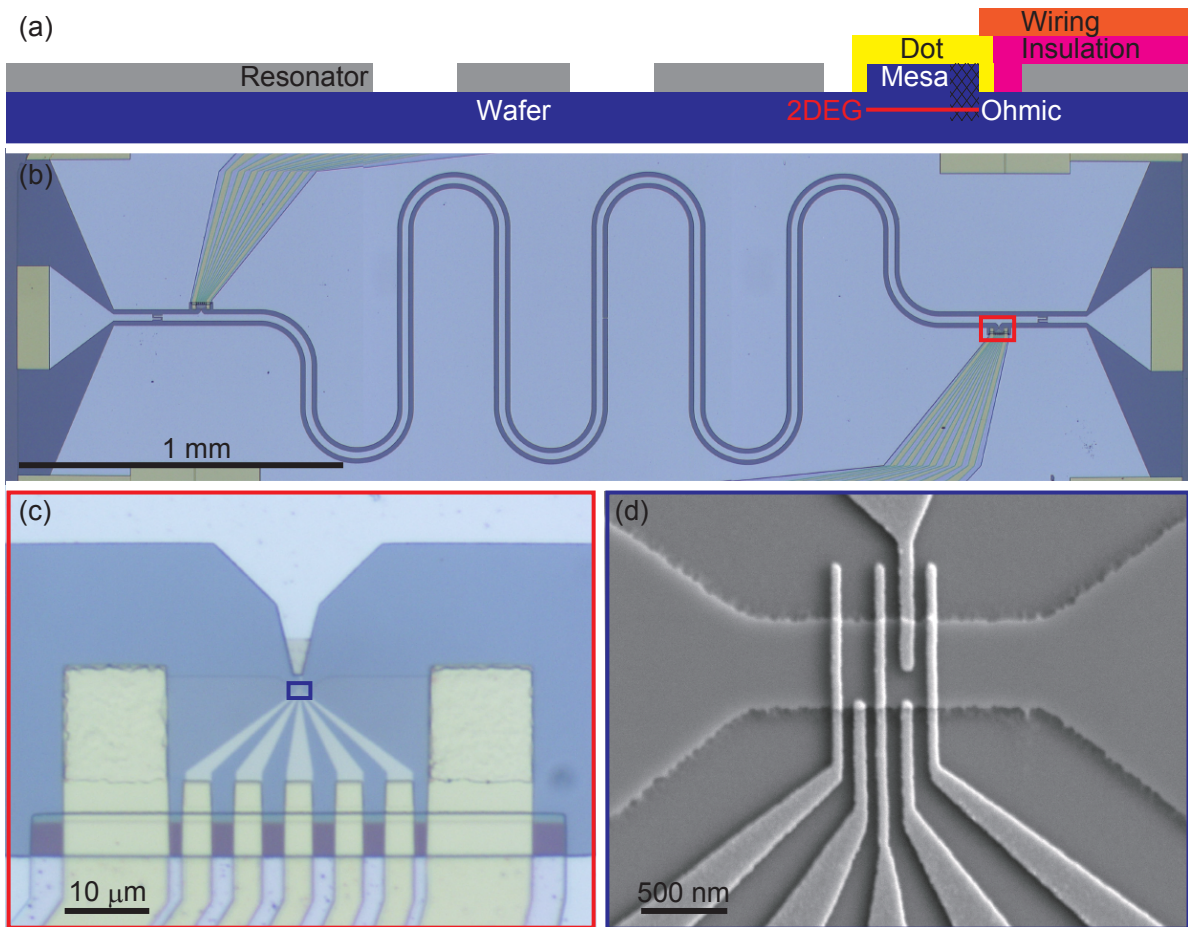


図1 (a) 作製した量子ドット-超伝導共振器結合デバイスの断面の模式図。(b) は試料の光学顕微鏡写真で、(c) は接続部を、(d) は量子ドット部を拡大したもの

アルミニウム薄膜で作製したコプレーナ型超伝導共振器（共振周波数 $\omega_0/2\pi = 8.3267$ GHz）の端に、2重量子ドットを結合している。この試料では半波長の共振器を用いているので、共振器の両端でマイクロ波の電圧振幅は最大になる。この電場の振動を静電的な結合により量子ドットに伝え、両者の強い結合を実現する。(c) は量子ドットと超伝導共振器の結合部の拡大図である。超伝導共振器の中心導体から量子ドットへ結合用のゲート電極が延びている。(d) は量子ドットの拡大図である。量子ドットの直上に乗せたゲート電極が量子ドットと超伝導共振器の静電的な結合を与える。左右2つの量子ドットの片側のみにゲートが結合することにより、左右の量子ドット間を行き来する電子による電場の振動と、共振器の電場の振動が効率よく結合する。

図2に2重量子ドット (=2準位系) のエネルギー間隔 ϵ を変えながら共振器のマイクロ波透過スペクトルを測定した結果を示す。(a) は透過強度を、(b) は位相をプロットしたものである。量子ドットのエネルギー間隔と共振器の中心周波数が一致する付近で、鋭い透過強度のディップが現れており、位相にもそれに対応する変化が見られる。図2で得られた実験結果を詳しく解析するために、共振ピーク周波数およびその線幅をフィッティングにより求めた。その結果を図3に示す。

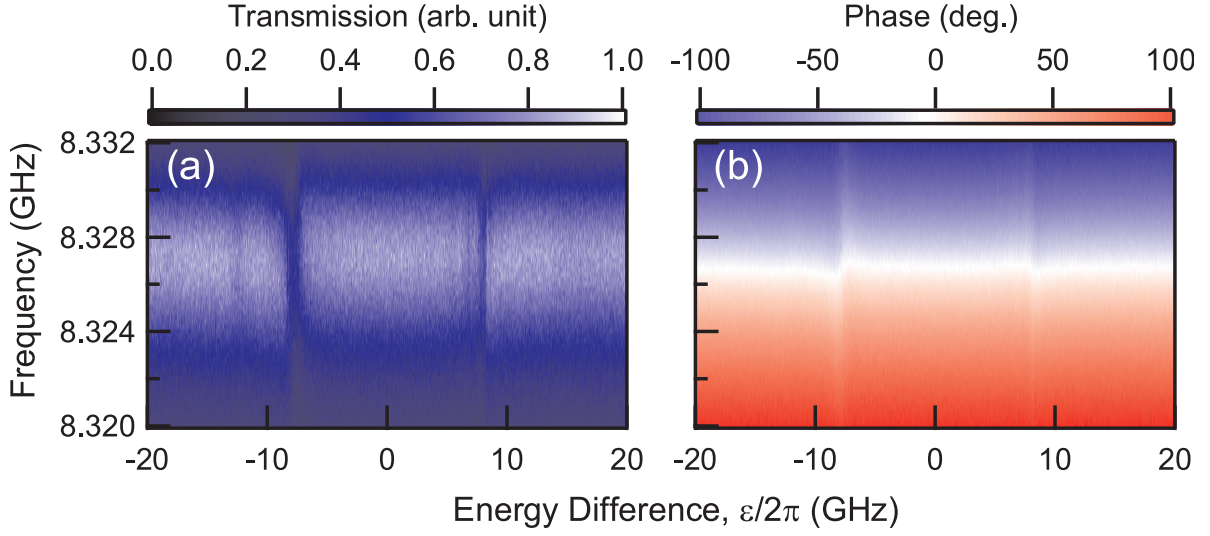


図2 量子ドットの準位間隔を変えながら測定した (a) 透過強度と (b) 位相

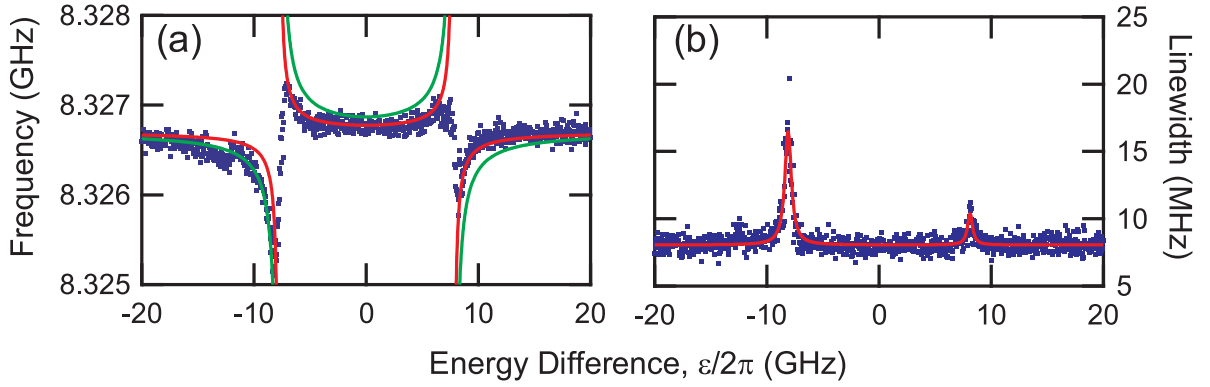


図3 図2の透過スペクトルから求めた (a) 共振ピーク周波数および (b) 線幅。(a)の赤(緑)線は式(2)を用い $g/2\pi = 20(30)$ MHzとした場合のフィッティング

2 準位系と電磁場が結合した系の性質は Jaynes-Cummings ハミルトニアン

$$\hat{H} = \frac{\hbar\Delta}{2}\hat{\sigma}_z + \hbar\omega_0\left(\hat{a}^\dagger\hat{a} + \frac{1}{2}\right) + \hbar g(\hat{\sigma}^+\hat{a} + \hat{\sigma}^-\hat{a}^\dagger) \quad (1)$$

により記述できる。ここで、 $\hat{\sigma}_z$ はパウリ行列、 $\hat{\sigma}^+$ 、 $\hat{\sigma}^-$ は昇降演算子、 \hat{a}^\dagger (\hat{a})は光子の生成(消滅)演算子である。また、 $\Delta = \sqrt{\varepsilon^2 + 4t^2}$ は左右の量子ドット間のトンネルレート t を含めた左右の量子ドット間のエネルギー間隔である。系全体の共振周波数は、Jaynes-Cummings ハミルトニアンの固有エネルギーを用いて、

$$\omega_{\pm} = \frac{\Delta}{2} + \frac{\omega_0}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\Delta - \omega_0)^2 + 4g^2} \quad (2)$$

と求めることができる。この結果は、 $\Delta = \omega_0$ 付近で共振周波数が式(2)の正負の符号に対応する反交差を示すことを意味しており、予想されるとおりの反交差が実験結果にはっきりと見られ

る。図 3(a) の実線は式 (2) による実験結果のフィットである。ここから、結合強度 $g/2\pi$ の値が 30(20) MHz と求まる。また、共振器のデコヒーレンスは量子ドットを動作させない状態での測定から $\kappa/2\pi = 8.0$ MHz と求まった。さらに、量子ドットのデコヒーレンスをマスター方程式による数値計算の結果から求め、 $\gamma/2\pi = 666$ MHz を得た。以上により、系を特徴づける結合強度とデコヒーレンスの値が求まった。

表 1 実験・数値計算から得られたパラメータのまとめ

		$\varepsilon < 0$	$0 < \varepsilon$
結合強度	$g/2\pi$	33 MHz	25 MHz
共振器のデコヒーレンス	$\kappa/2\pi$	8.0 MHz	8.0 MHz
量子ドットのデコヒーレンス	$\gamma/2\pi$	666 MHz	666 MHz
臨界原子数	$N_0 = 2\gamma\kappa/g^2$	9.8	17
臨界光子数	$n_0 = \gamma^2/2g^2$	204	355
Rabi 振動回数	$n_{\text{Rabi}} = 2g/(\kappa + \gamma)$	0.098	0.074

表 1 に今回の実験で得られた系を特徴づけるパラメータをまとめた。結合強度は、超伝導量子ビットの場合 [3] と同程度の値が得られている。系のデコヒーレンスは量子ドットのデコヒーレンスに支配されており、強結合の実現には改善が必要であると言える。量子ドットのデコヒーレンスの値は類似の系の実験結果 [4] より 5 倍程度小さいものである。

デコヒーレンスの原因についての考察は論文に譲るが、量子ドット・超伝導共振器の両方に共通するデコヒーレンスの原因が基板として使用した GaAs の圧電効果であることがわかった。この結果は、さらに強い結合強度を得るために使用すべき材料についての指針を与えるものである。

以上により、

1. 超伝導量子ビットの場合と同等の結合強度が量子ドットによる Circuit QED 系でも得られること
2. 結合強度とデコヒーレンスの比を改善するためには圧電効果によるデコヒーレンスが少ない材料を使うべきであること

が言える。

参考文献

- [1] H. Toida, T. Nakajima, and S. Komiyama. Circuit QED using a semiconductor double quantum dot. *arXiv: 1206.0674*, June 2012.
- [2] Herbert Walther, Benjamin T. H. Varcoe, Berthold-Georg Englert, and Thomas Becker. Cavity quantum electrodynamics. *Reports on Progress in Physics*, Vol. 69, pp. 1325–1382, 2006.

- [3] A. Wallraff, D.I. Schuster, A. Blais, L. Frunzio, R.-S. Huang, J. Majer, S. Kumar, S.M. Girvin, and R.J. Schoelkopf. Strong coupling of a single photon to a superconducting qubit using circuit quantum electrodynamics. *Nature (London)*, Vol. 431, pp. 162–167, 2004.
- [4] T. Frey, P. J. Leek, M. Beck, A. Blais, T. Ihn, K. Ensslin, and A. Wallraff. Dipole coupling of a double quantum dot to a microwave resonator. *Physical Review Letters*, Vol. 108, No. 4, pp. 046807–, January 2012.