

Схемотехника сверхпроводниковых кубитов

Илья Беседин

Научный руководитель:

Алексей Устинов, проф., д. ф-м. н.



RQC

Russian
Quantum
Center

Введение

Macroscopic Quantum Systems and the Quantum Theory of Measurement

A. J. LEGGETT

*School of Mathematical and Physical Sciences
University of Sussex, Brighton BN1 9QH*

(Received August 27, 1980)

This paper discusses the question: How far do experiments on the so-called “macroscopic quantum systems” such as superfluids and superconductors test the hypothesis that the linear Schrödinger equation may be extrapolated to arbitrarily complex systems? It is shown that the familiar “macroscopic

Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring

Peter W. Shor
AT&T Bell Labs
Room 2D-149
600 Mountain Ave.
Murray Hill, NJ 07974, USA

Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box

Y. Nakamura^{*}, Yu. A. Pashkin[†] & J. S. Tsai^{*}

^{*} NEC Fundamental Research Laboratories, Tsukuba, Ibaraki 305-8565, Japan
[†] CREST, Japan Science and Technology Corporation (JST), Kawaguchi, Saitama 332-0012, Japan

Article

Quantum supremacy using a programmable superconducting processor

<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>

Received: 22 July 2019

Accepted: 20 September 2019

Published online: 23 October 2019

Frank Arute¹, Kunal Arya¹, Ryan Babbush¹, Dave Bacon¹, Joseph C. Bardin^{1,2}, Rami Barends¹, Rupak Biswas¹, Sergio Boixo¹, Fernando G. S. L. Brandao^{1,4}, David A. Buell¹, Brian Burkett¹, Yu Chen¹, Zijun Chen¹, Ben Chiaro¹, Roberto Collins¹, William Courtney¹, Andrew Dunsworth¹, Edward Farhi¹, Brooks Foxen^{1,5}, Austin Fowler¹, Craig Gidney¹, Marissa Giustina¹, Rob Graff¹, Keith Guerini¹, Steve Habegger¹, Matthew P. Harrigan¹, Michael J. Hartmann^{1,6}, Alan Ho¹, Markus Hoffmann¹, Trent Huang¹, Travis S. Humble¹, Sergei V. Isakov¹, Evan Jeffrey¹, Zhang Jiang¹, Dvir Kafri¹, Kostyantyn Kechedzhi¹, Julian Kelly¹, Paul V. Klimov¹, Sergey Knysh¹, Alexander Korotkov^{1,6}, Fedor Kostritsa¹, David Landhuis¹, Mike Lindmark¹, Erik Lucero¹, Dmitry Lyakh¹, Salvatore Mandrà^{1,10}, Jarrod R. McClean¹, Matthew McEwen¹, Anthony Megrant¹, Xiao Mi¹, Kristel Michielsen^{1,10}, Masoud Mohseni¹, Josh Mutus¹, Ofer Naaman¹, Matthew Neeley¹, Charles Neill¹, Murphy Yuezhen Niu¹, Eric Ostby¹, Andre Petukhov¹, John C. Platt¹, Chris Quintana¹, Eleanor G. Rieffel¹, Pedram Roushan¹, Nicholas C. Rubin¹, Daniel Sank¹, Kevin J. Satzinger¹, Vadim Smelyanskiy¹, Kevin J. Sung^{1,12}, Matthew D. Trevithick¹, Amit Vainsencher¹, Benjamin Villeden^{1,14}, Theodore White¹, Z. Jamie Yao¹, Ping Yeh¹, Adam Zalcman¹, Hartmut Neven¹ & John M. Martinis^{1,15}

1980

1990

2000

2010

2020

Simulating Physics with Computers

Richard P. Feynman

Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91107

Received May 7, 1981

1. INTRODUCTION

On the program it says this is a keynote speech—and I don't know what a keynote speech is. I do not intend in any way to suggest what should be in this meeting as a keynote of the subjects or anything like that. I have my own things to say and to talk about and there's no implication that anybody needs to talk about the same thing or anything like it. So what I

PHYSICAL REVIEW A 76, 042319 (2007)

Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box

Jens Koch,¹ Terri M. Yu,¹ Jay Gambetta,¹ A. A. Houck,¹ D. I. Schuster,¹ J. Majer,¹ Alexandre Blais,² M. H. Devoret,¹ S. M. Girvin,¹ and R. J. Schoelkopf¹

¹Departments of Physics and Applied Physics, Yale University, New Haven, Connecticut 06520, USA

²Département de Physique et Regroupement Québécois sur les Matériaux de Pointe, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1

(Received 22 May 2007; published 12 October 2007)

nature

Vol 460 | 9 July 2009 | doi:10.1038/nature08121

LETTERS

Demonstration of two-qubit algorithms with a superconducting quantum processor

L. DiCarlo¹, J. M. Chow¹, J. M. Gambetta², Lev S. Bishop¹, B. R. Johnson¹, D. I. Schuster¹, J. Majer¹, A. Blais¹, L. Frunzio¹, S. M. Girvin¹ & R. J. Schoelkopf¹

Актуальность и практическая значимость

Актуальность работы обусловлена, с одной стороны, потребностью в масштабировании сверхпроводниковых квантовых электрических цепей, используемых для квантовой симуляции, а с другой стороны – интересом к практической реализации универсального квантового компьютера и квантовых симуляторов среднего масштаба с десятками кубитов. Исследованные в диссертации структуры на основе трансмонов и методы реализации квантовых вентиляей могут быть использованы при разработке таких устройств.

Практическая значимость связана, во-первых, с возможностью использования аналитической модели для быстрого проектирования систем частотно-мультиплексированного считывания в микроволновых интегральных микросхемах, и во-вторых, с демонстрацией возможности использования сверхпроводниковых электрических цепей для симуляции квантовой динамики больших систем мета-атомов. Кроме того, развитые методы проектирования сверхпроводниковых схем с кубитами и импульсные методы реализации вентиляей являются фундаментом для построения более масштабных квантовых процессоров и симуляторов на основе сверхпроводниковых кубитов.

Цель и задачи

Цель: проектирование, теоретическое и экспериментальное исследование сверхпроводниковых квантовых электрических схем и метаматериалов на их основе

Задачи:

- Разработать аналитический метод расчёта внешней добротности сверхпроводниковых копланарных резонаторов, связанных посредством распределённых взаимных индуктивностей и ёмкостей с передающей линией;
- Развить методы проектирования и измерения характеристик систем сверхпроводниковых кубитов, связанных как с объёмными, так и с копланарным резонаторами;
- Разработать экспериментальную установку для измерения микроволнового отклика сверхпроводниковых квантовых электрических схем;
- Продемонстрировать работу простейшего квантового алгоритма – алгоритма Гровера – на квантовом процессоре из двух кубитов;
- Разработать и исследовать симулятор интересной квантовой системы – гамильтониана Бозе-Хаббарда для модели Су-Шриффера-Хигера.

Положения и научная новизна

Положения, выносимые на защиту:

1. Получены аналитические формулы для зависимости частоты и добротности резонатора, связанного с передающей линией, от его геометрических размеров и входных импедансов линии.
2. Разработан метод проектирования сверхпроводниковых кубитов-трансмонов, связанных с объёмным резонатором, и алгоритм калибровки квантовых вентилях и считывания.
3. Исследован микроволновый отклик метаматериала на основе цепочки ёмкостно связанных сверхпроводниковых кубитов-трансмонов, реализующий гамильтониан Бозе-Хаббарда с константами связи, отвечающими модели Су-Шриффера-Хигера.

Научная новизна:

1. Впервые получена аналитическая модель для частоты и внешней добротности копланарного резонатора со слабой распределённой связью с передающей линией в геометрии, используемой для частотно-мультиплексированного считывания кубитов;
2. В квантовом метаматериале на основе цепочки ёмкостно связанных сверхпроводниковых кубитов-трансмонов, реализующий гамильтониан Бозе-Хаббарда с константами связи, отвечающими модели Су-Шриффера-Хигера, впервые исследованы топологические свойства двухфотонных возбуждений – дублонов.

Список публикаций по теме диссертации

- **Besedin, I.**, Menushenkov, A.P. Quality factor of a transmission line coupled coplanar waveguide resonator. *EPJ Quantum Technol.* **5**, 2 (2018).
- **И.С. Беседин**, Г.П. Федоров, В. В. Рязанов. Сверхпроводящие кубиты в России. *Квантовая электроника* **48** (10): 880 (2018)
- **Ilya S. Besedin**, Maxim A. Gorlach, Nikolay N. Abramov, *et al.* Topological excitations and bound photon pairs in a superconducting quantum metamaterial. *Phys. Rev. B* **103**, 224520 (2021)

- Aleksey N. Bolgar, Julia I. Zotova, Daniil D. Kirichenko, **Ilya S. Besedin**, Aleksander V. Semenov, Rais S. Shaikhaidarov, and Oleg V. Astafiev. Quantum Regime of a Two-Dimensional Phonon Cavity. *Phys. Rev. Lett.* **120**, 223603 (2018)
- K.V. Shulga, E. Il'ichev, M.V. Fistul, **I. S. Besedin**, S. Butz, O. V. Astafiev, U. Hübner & A. V. Ustinov *et al.* Magnetically induced transparency of a quantum metamaterial composed of twin flux qubits. *Nat Commun* **9**, 150 (2018)
- Moskalenko, I.N., **Besedin, I.S.**, Tsitsilin, I.A. *et al.* Planar Architecture for Studying a Fluxonium Qubit. *Jetp Lett.* **110**, 574–579 (2019)
- I. N. Moskalenko, **I. S. Besedin**, S. S. Seidov, M. V. Fistul, and A. V. Ustinov. Quantum beats of a magnetic fluxon in a two-cell SQUID. *Phys. Rev. B* **103**, 224528 (2021)

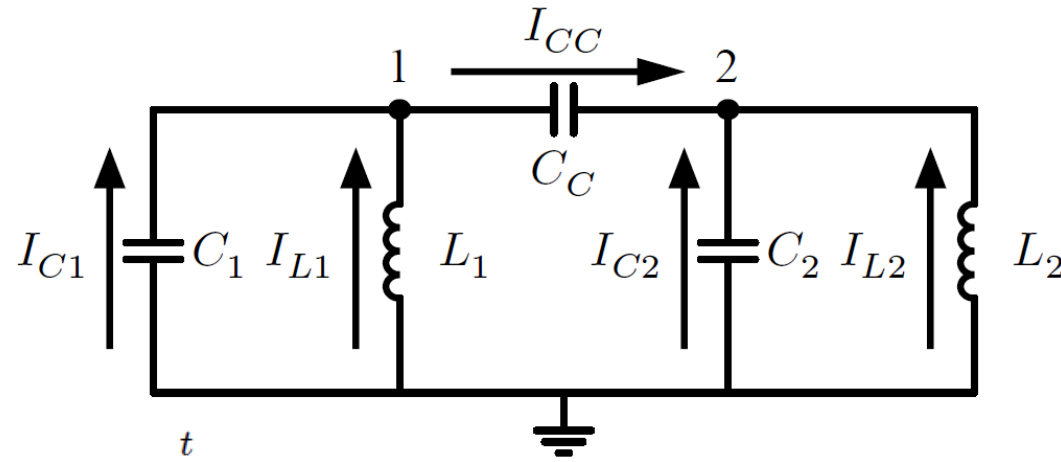
Содержание работы

- Введение:
- Глава 1: Теоретические сведения и обзор литературы
- Глава 2: Резонаторы
- Глава 3: Трансмоны
- Глава 4: Двухкубитный процессор (результаты не опубликованы и не выносятся на защиту)
- Глава 5: Цепочка трансмонов
- Заключение
- Приложения

Глава 1

Введение

Квантование электрических цепей на примере двух LC-контуров



Обобщённая координата $\Phi(t) = \int_0^t V(t) dt$

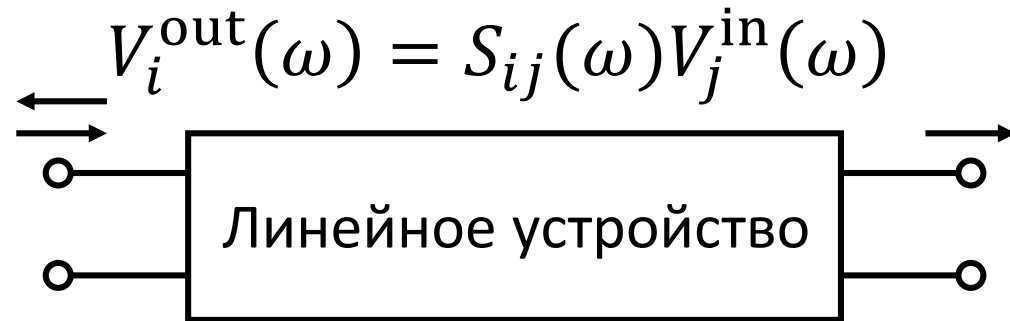
Функция Лагранжа $L(\Phi_1, \Phi_2, \dot{\Phi}_1, \dot{\Phi}_2) = \frac{C_1 \dot{\Phi}_1^2}{2} + \frac{C_2 \dot{\Phi}_2^2}{2} + \frac{C_C (\dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_2)^2}{2} - \frac{\Phi_1^2}{2L_1} - \frac{\Phi_2^2}{2L_2}$

$$L(\vec{\Phi}, \dot{\vec{\Phi}}) = \frac{1}{2} \dot{\vec{\Phi}} \hat{C} \dot{\vec{\Phi}}^T - \frac{1}{2} \vec{\Phi} \hat{L}^{-1} \vec{\Phi}^T \quad \hat{C} = \begin{pmatrix} C_1 + C_C & -C_C \\ -C_C & C_2 + C_C \end{pmatrix}, \hat{L}^{-1} = \begin{pmatrix} 1/L_1 & 0 \\ 0 & 1/L_2 \end{pmatrix}$$

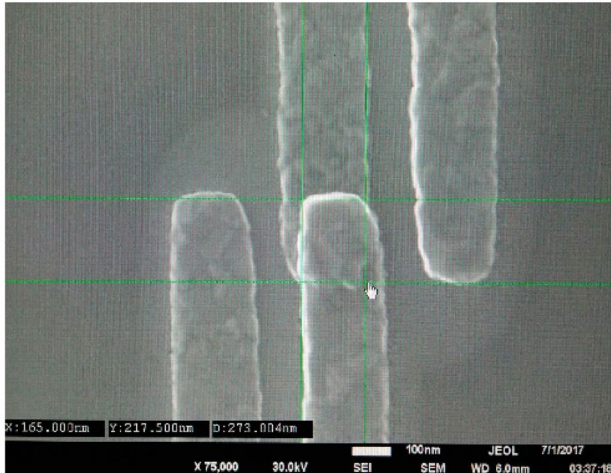
Функция Гамильтона $H(\vec{\Phi}, \vec{Q}) = \frac{1}{2} \vec{Q} \hat{C}^{-1} \vec{Q}^T + \frac{1}{2} \vec{\Phi} \hat{L}^{-1} \vec{\Phi}^T$

Квантовые электрические цепи

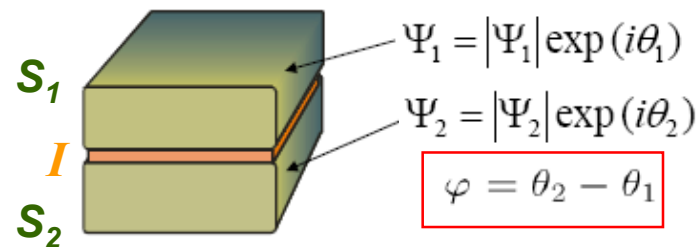
Линейные системы не имеют памяти:



Бездиссипативный нелинейный элемент сверхпроводниковой электроники:
Джозефсоновский SIS контакт



Туннельный контакт



- Разность фаз на переходе

$$\begin{cases} I = I_c \sin \varphi \\ V = \frac{\hbar}{2e} \dot{\varphi} \end{cases} \quad \varphi = \frac{2e\Phi}{\hbar}$$

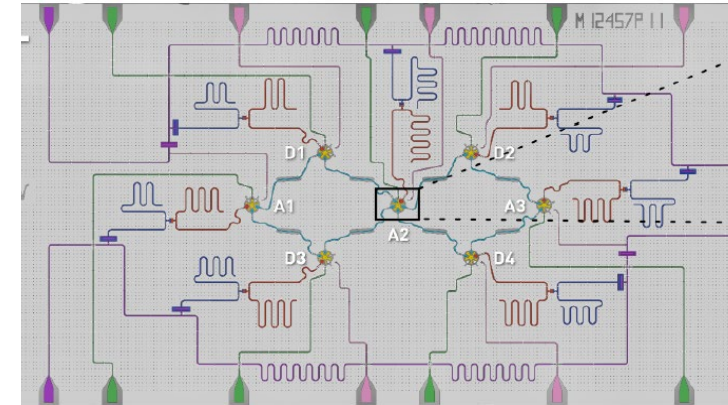
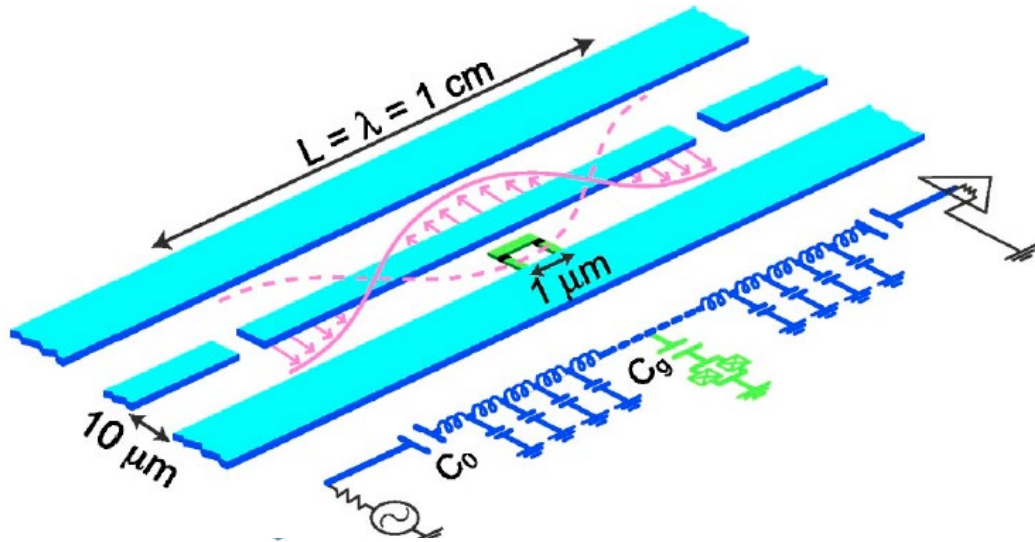
$$E = \int_0^{\varphi(t)} V(t)I(t)dt = \frac{\hbar}{2e} I_c (1 - \cos \varphi)$$

$$E(\Phi) = \frac{\Phi^2}{2L_J} - \left(\frac{2e}{\hbar}\right)^2 \frac{\Phi^4}{24L_J} + \dots, L_J = \frac{2e}{\hbar I_c}$$

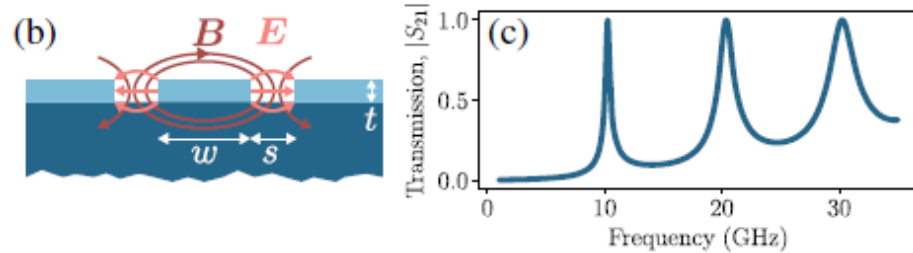
Глава 2

Копланарный резонатор

Копланарный волновод



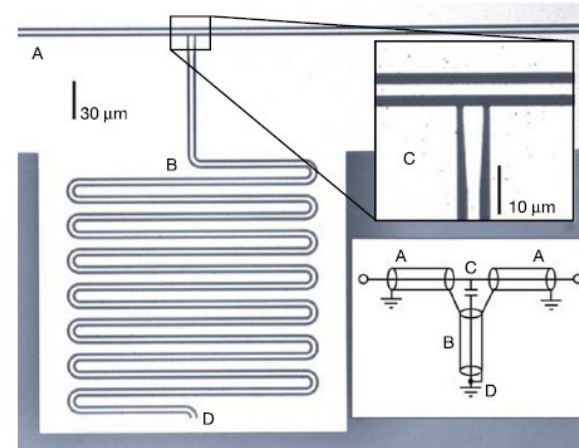
NATURE PHYSICS | VOL 16 | AUGUST 2020 | 875-880 | www.nature.com/naturephysics



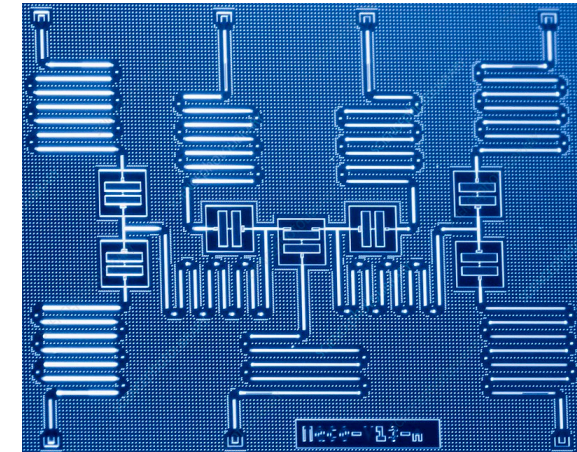
PHYSICAL REVIEW A **69**, 062320 (2004)

$$f_r = \frac{c_l}{4l}(2p - 1), \quad \lambda/4 \text{ resonator}$$

$$f_r = \frac{c_l}{4l}2p, \quad \lambda/2 \text{ resonator}$$



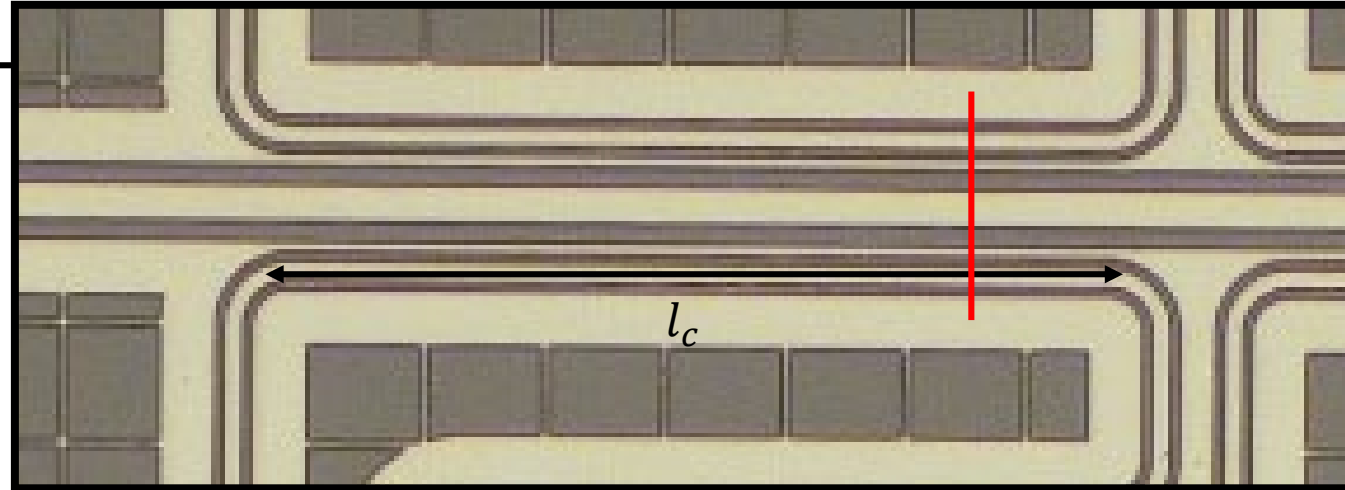
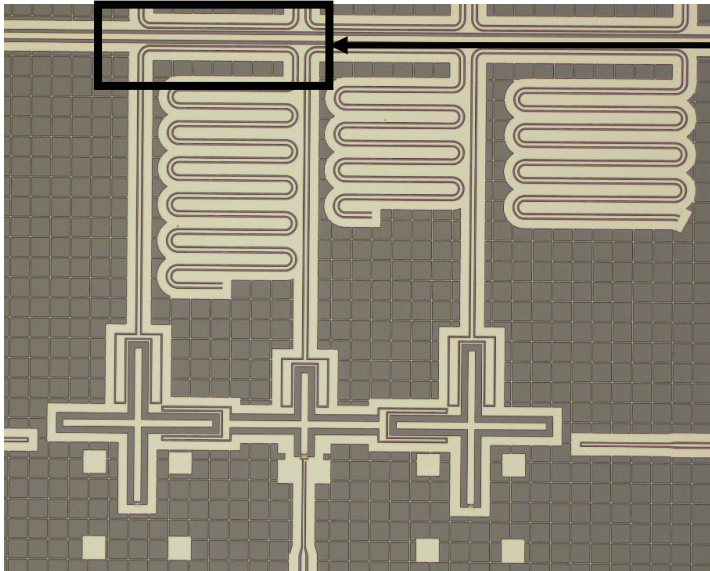
MKID Nature **425**, 817 (2003)



IBM 7-qubit processor

Копланарные резонаторы широко используются в сверхпроводниковых кубитных схемах

Добротность копланарного резонатора



Постановка задачи:

$$Q_i(l_c, \text{геометрия сечения}) = ?$$

Ёмкостная связь: [22] M. Göppl et al. Coplanar waveguide resonators for circuit quantum electrodynamics // Journal of Applied Physics – 2008 – Vol. 104 – P. 113904

Индуктивная связь: [23] D. Bothner et al. Inductively coupled superconducting half wavelength resonators as persistent current traps for ultracold atoms // New Journal of Physics – 2013. Vol. 15

Ёмкостная+индуктивная связь: [24] M.S. Khalil et al. An analysis method for asymmetric resonator transmission applied to superconducting devices // Journal of Applied Physics -- Vol. 111, no. 5.

Распределённая связь: [37] I. Besedin, A.P. Menushenkov. Quality factor of a transmission line coupled coplanar waveguide resonator // EPJ Quantum Technology – 2018 – Vol.5, no. 5 – P. 2.

$$S_{kl}(f) = A_{kl} \left(1 + \frac{B_{kl}}{f - f_p} \right)$$

Комплексный параметр рассеяния

$$f_p = f_p' + if_p''$$

Полюс амплитуды рассеяния

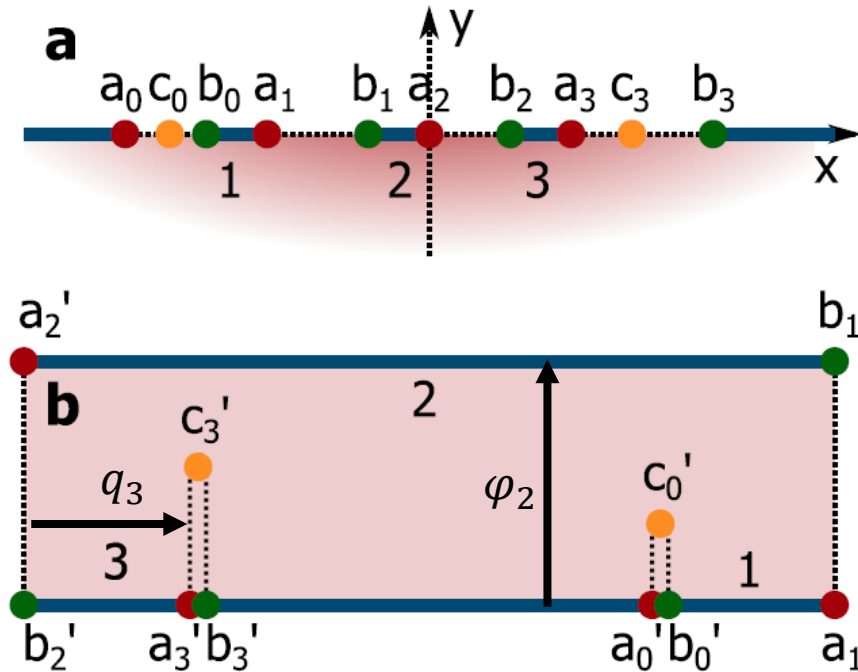
Конформное отображение

$$\frac{\partial V}{\partial z} = -\mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial t},$$

$$\frac{\partial \mathbf{I}}{\partial z} = -\mathbf{C} \frac{\partial V}{\partial t}.$$

Телеграфные уравнения для
многопроводной линии передач

\mathbf{L} , \mathbf{C} – матрицы взаимной
индуктивности и ёмкости

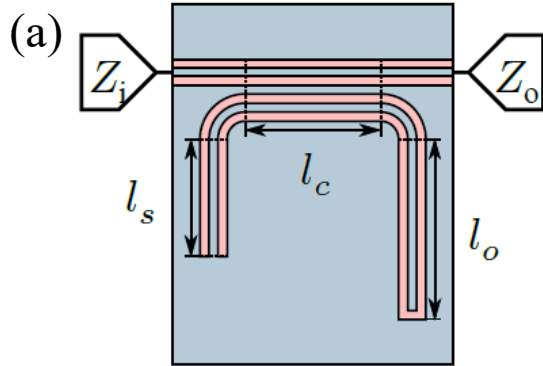


$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} -\frac{q_1}{\varphi_1} \\ \frac{q_2}{\varphi_2} \\ -\frac{q_3}{\varphi_2} \end{pmatrix}$$

$$w(z) = \int_0^z \frac{\prod_{j \in \{1, \dots, n\} \setminus \{i, i+1\}} (z - c_j)}{\prod_{k=0}^n (z - a_k)^{1/2} \prod_{l=0}^n (z - b_l)^{1/2}} dz,$$

c_0, c_3 неявно определены через $\text{Im}[w(c_0)] = 0, \text{Im}[w(c_3)] = 0$

Четвертьволновой резонатор



Аналитическое выражение для сдвига полюсов амплитуды рассеяния

$$\frac{\partial \Delta^a}{\partial f} = \frac{32\pi}{c_l} (-1)^p Z_r^3 (l_c + l_o + l_s) \times$$

$$\left(-Z_f (Z_i + Z_o) \cos \theta + i (Z_f^2 + Z_i Z_o) \sin \theta \right),$$

$$\frac{\partial \Delta^a}{\partial Z_2} = -16 (-1)^p Z_r^2 \sin \theta \cos \psi \times$$

$$\left(-Z_f (Z_i + Z_o) \cos \theta + i (Z_f^2 + Z_i Z_o) \sin \theta \right),$$

$$\frac{\partial \Delta^a}{\partial \kappa} = 0,$$

$$\frac{\partial^2 \Delta^a}{\partial \kappa^2} = 16 (-1)^p Z_r^3 \sin \theta \times$$

$$\left(Z_f (Z_o - Z_i) \sin \psi \sin \theta - \right.$$

$$Z_f (Z_i + Z_o) (2 \cos \psi \cos \theta + 1) +$$

$$\left. i (3Z_f^2 + Z_i Z_o) \sin \theta \cos \psi \right),$$

$$\psi = 2\pi (l_c + 2l_o) f_r^{(0)} / c_l,$$

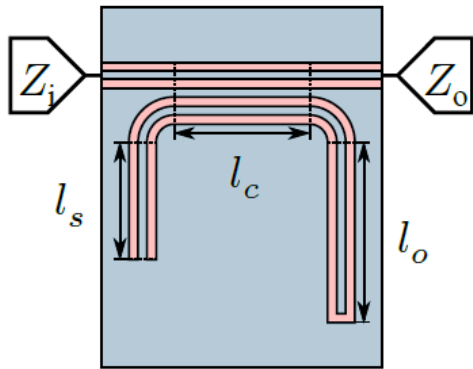
$$\theta = 2\pi l_c f_r^{(0)} / c_l.$$

Согласованная по импедансу передающая линия

$$Z_i = Z_f = Z_o$$

$$Q_c = \frac{\pi(2p - 1)}{2\kappa^2 \sin^2 \theta}$$

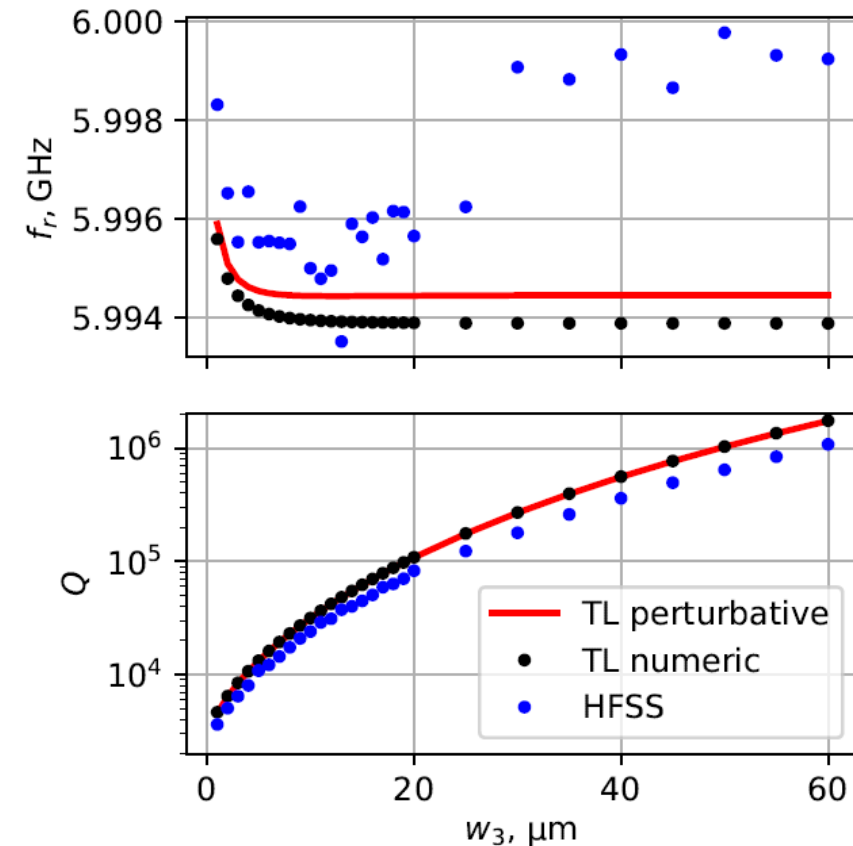
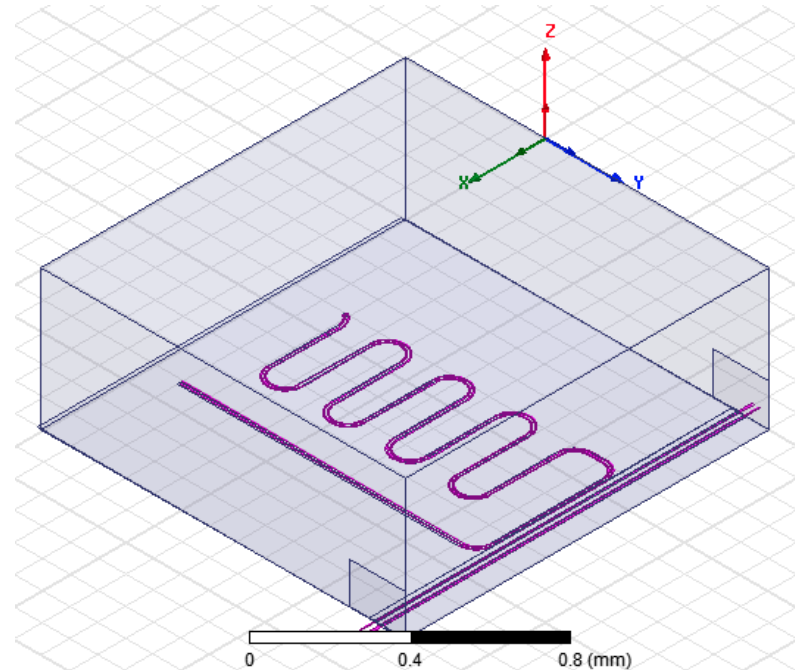
Сравнение с трёхмерной симуляцией



Согласованная по импедансу
передающая линия

$$Z_i = Z_f = Z_o$$

$$Q_c = \frac{\pi(2p - 1)}{2\kappa^2 \sin^2 \theta}$$



Большая связь с линией в 3D симуляции обусловлена связью за пределами секции ответвителя

Part 3

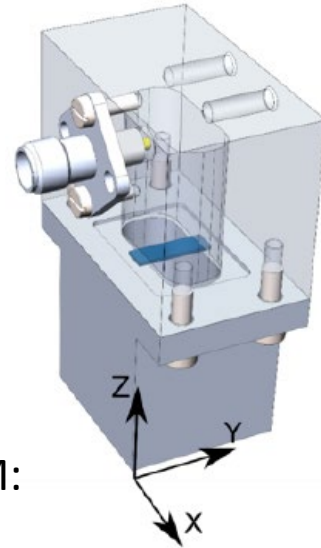
Трансмон в трёхмерной полости

Трансмон в трёхмерной полости

$$\hat{H}/\hbar = \left(\omega_{\text{RF}}^q + \frac{1}{2} \delta_q (\hat{a}^\dagger \hat{a} - 1) \right) \hat{a}^\dagger \hat{a} +$$

$$\left(\omega_{\text{RF}}^r + \frac{1}{2} \delta_r (\hat{b}^\dagger \hat{b} - 1) \right) \hat{b}^\dagger \hat{b} +$$

$$\chi \left(\hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{1}{2} \right) \left(\hat{b}^\dagger \hat{b} + \frac{1}{2} \right),$$

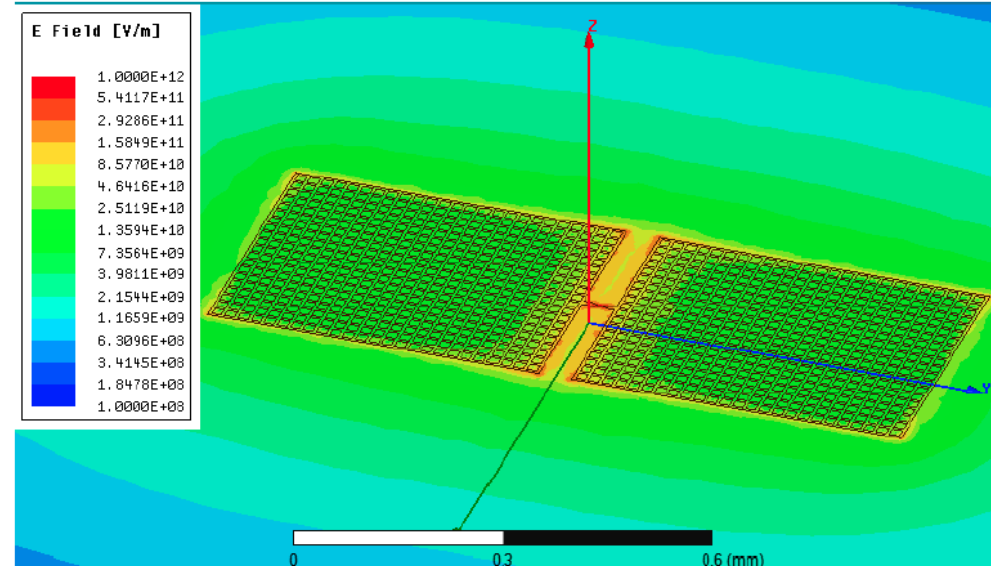


Параметры памильтониана из 3D FEM:

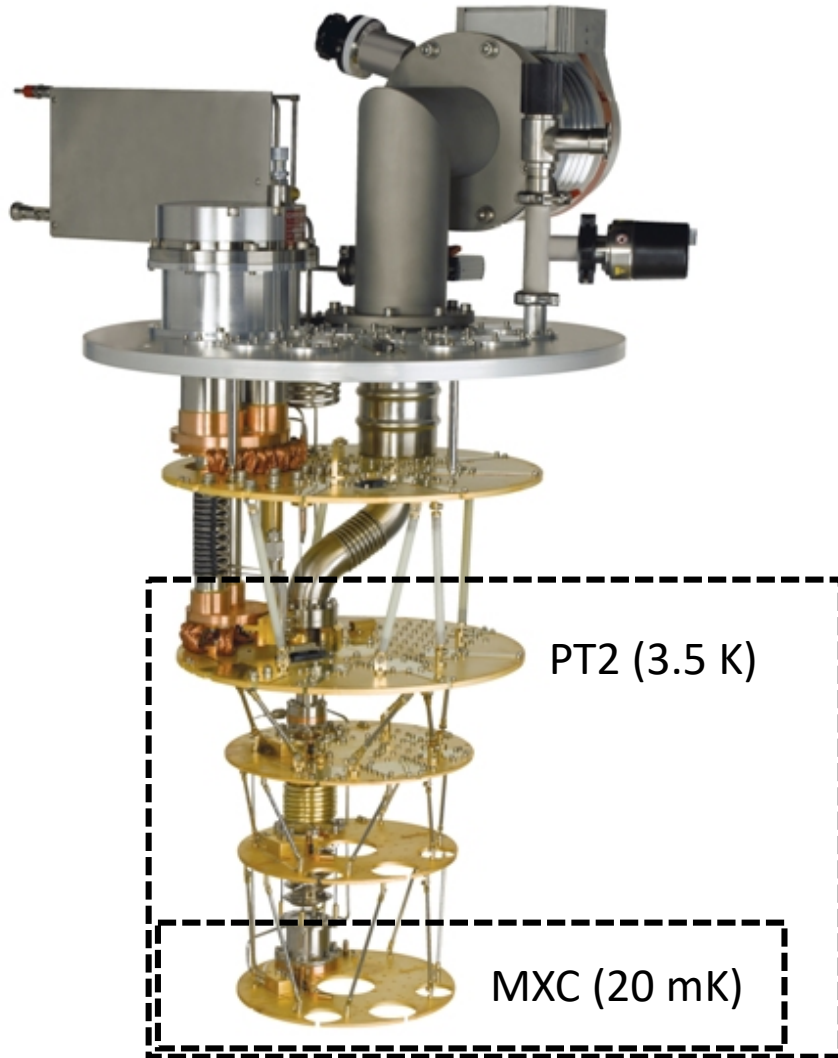
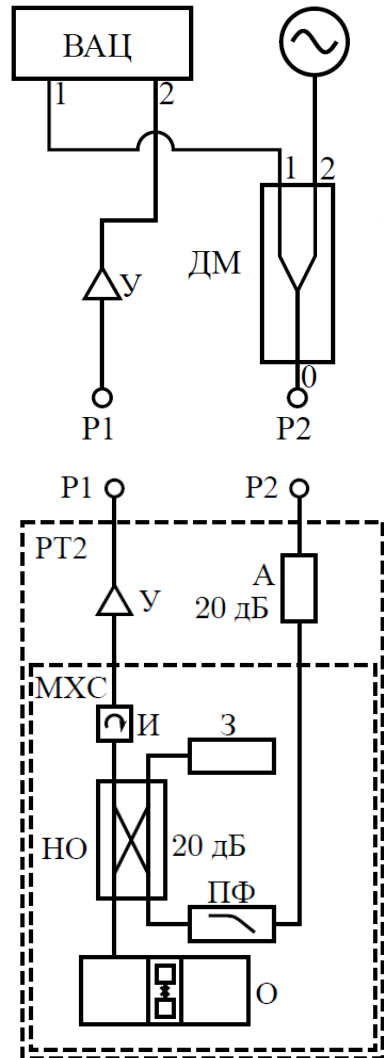
$$\frac{\omega_r}{2\pi} = 9,56 \text{ GHz}, \quad \frac{\delta_r}{2\pi} \sim -1 \text{ Hz}$$

$$\frac{\omega_q}{2\pi} = 6,56 \text{ GHz}, \quad \frac{\delta_q}{2\pi} = -174 \text{ MHz}$$

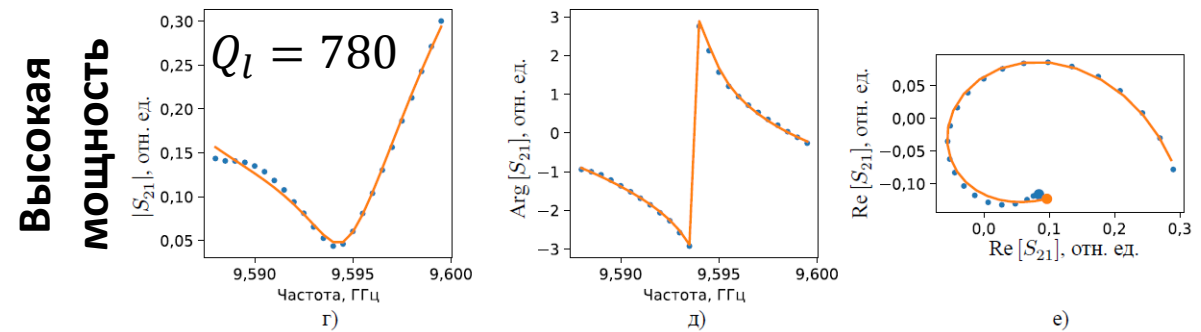
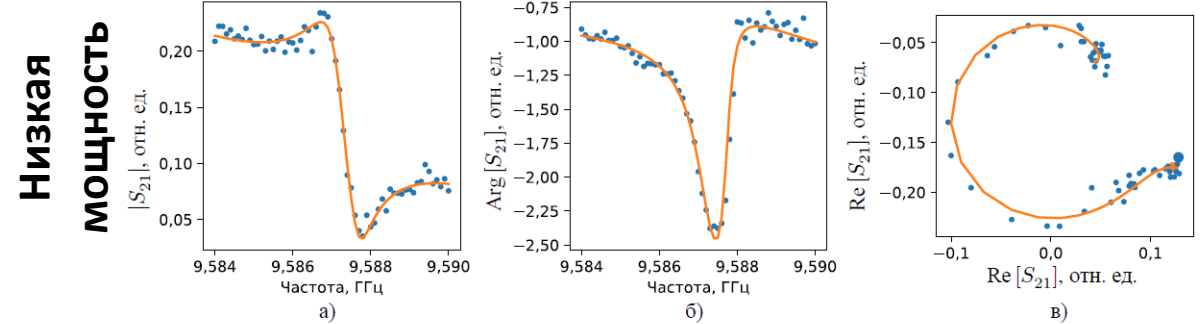
$$\chi = -1 \text{ MHz}$$



Спектроскопия

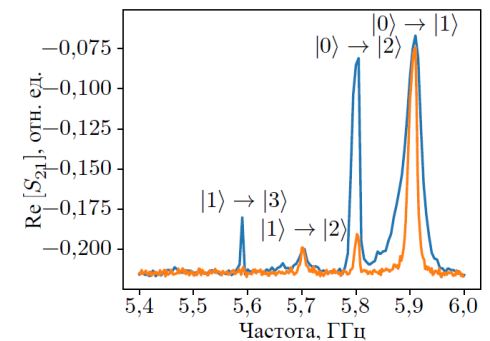


Низкая мощность

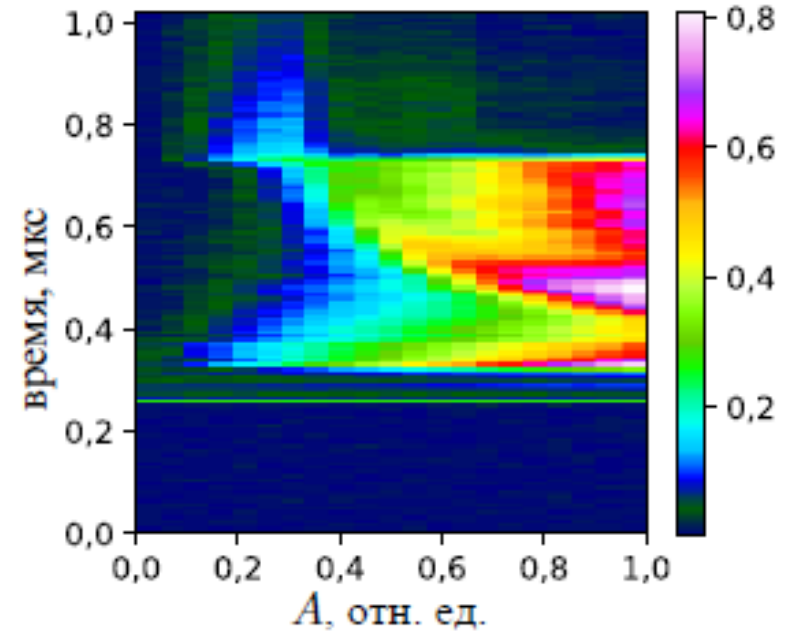
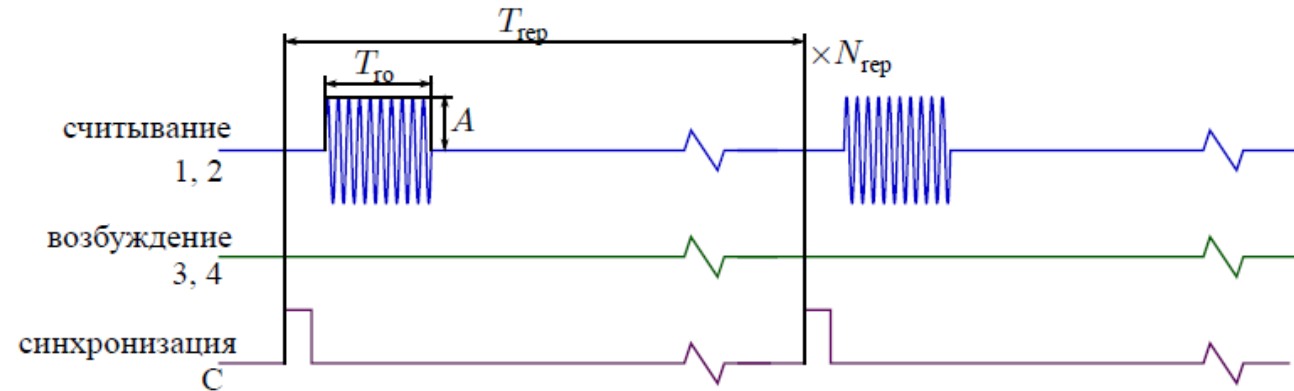
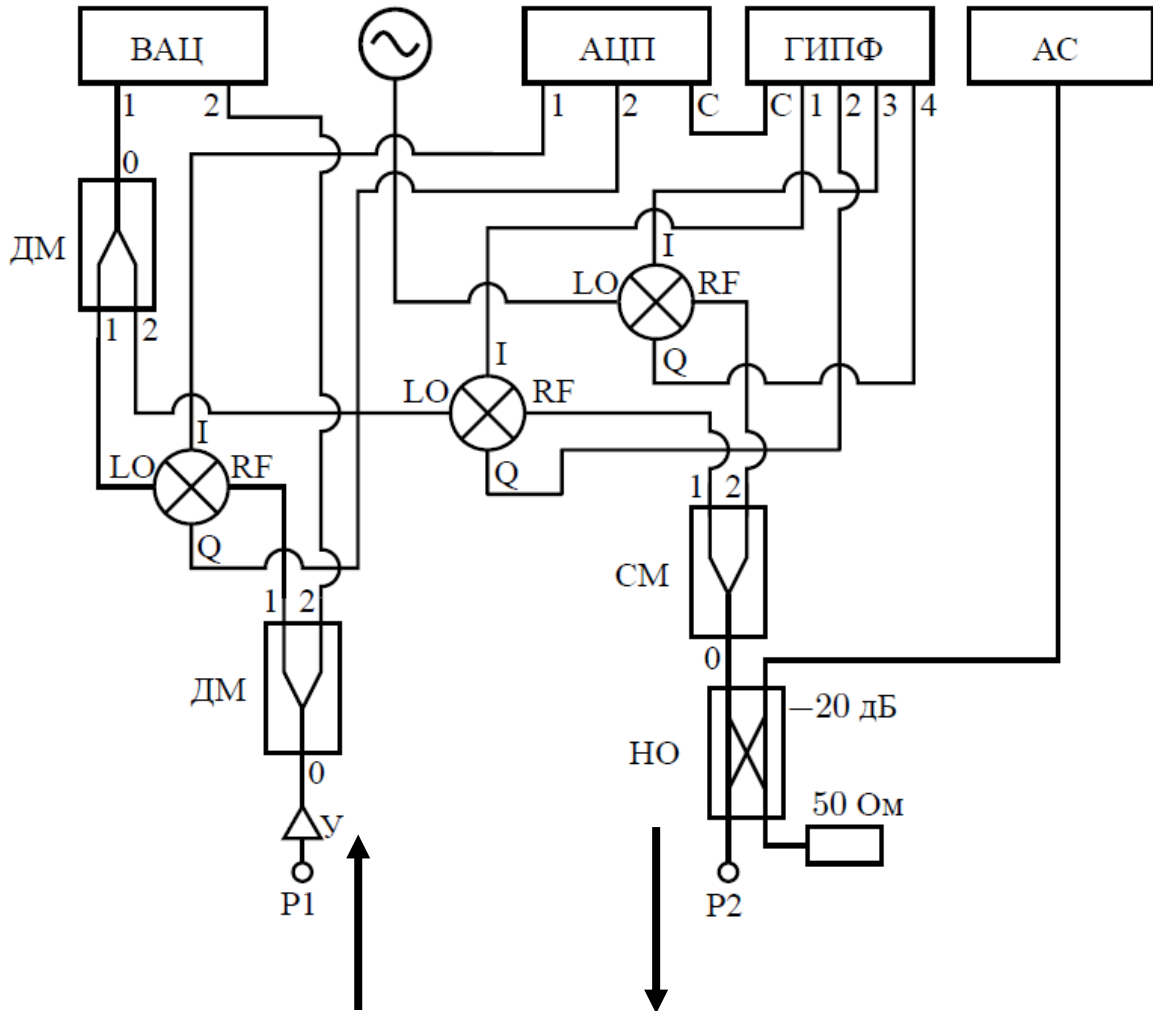


Двухтоновые спектры

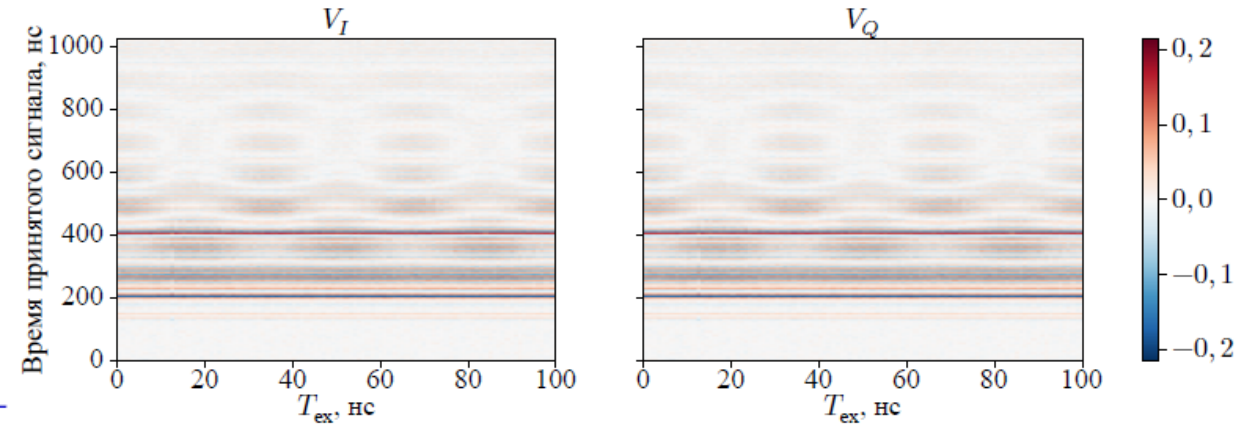
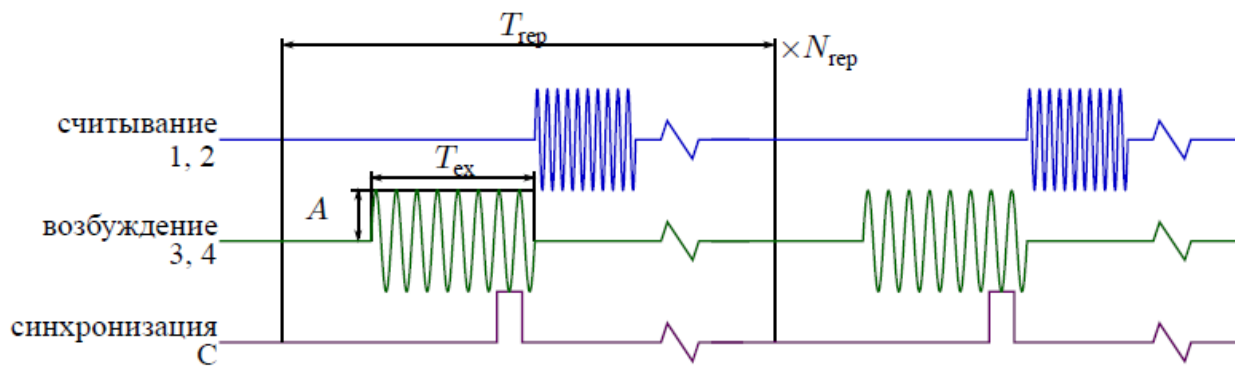
0 дБ, 10 дБ



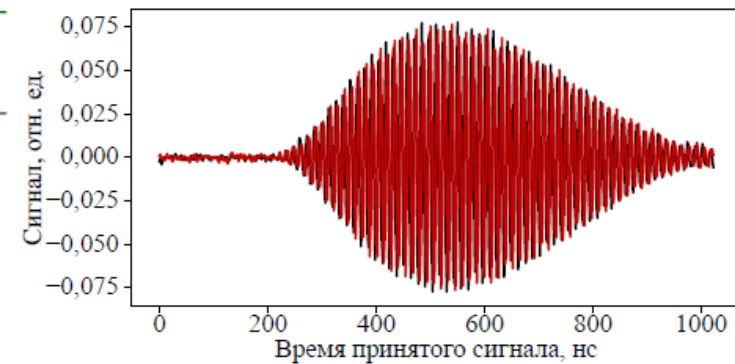
Импульсные отклик



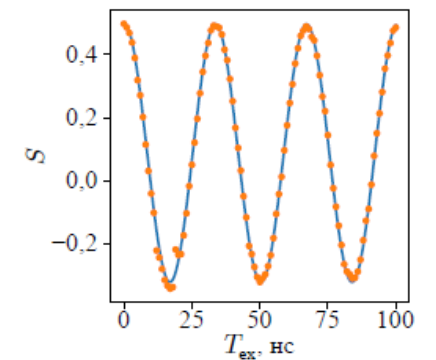
Осцилляции Раби



а) зависимость принятого сигнала от длительности возбуждающего импульса

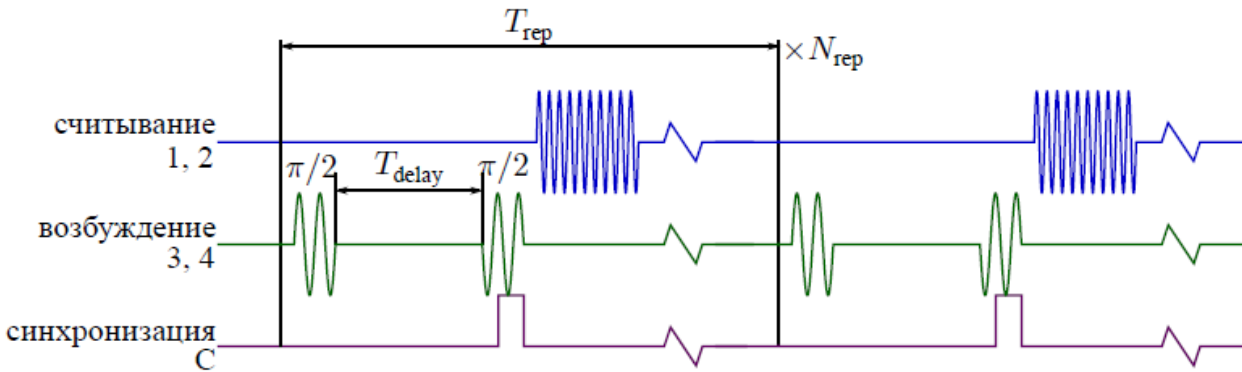


б) главная компонента сигнала для различных длительностей импульсов

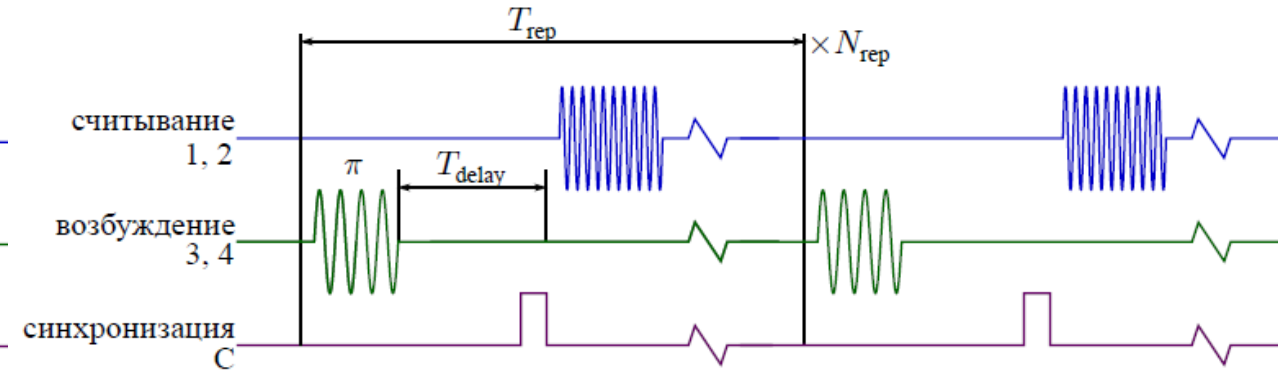


в) проекция сигнала на главную компоненту

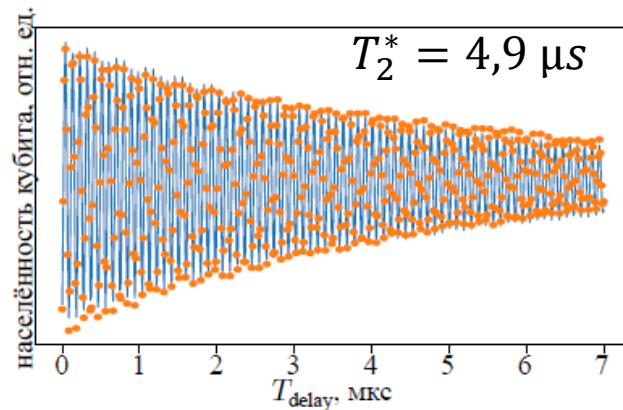
Осцилляции Рамзея и энергетическая релаксация



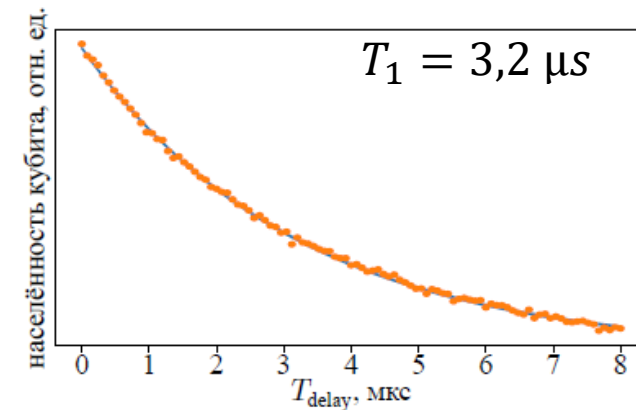
а) последовательность импульсов для наблюдения осцилляций Рамзея



а) последовательность импульсов для наблюдения релаксации кубита



б) населённость кубита в зависимости от длительности задержки между импульсами



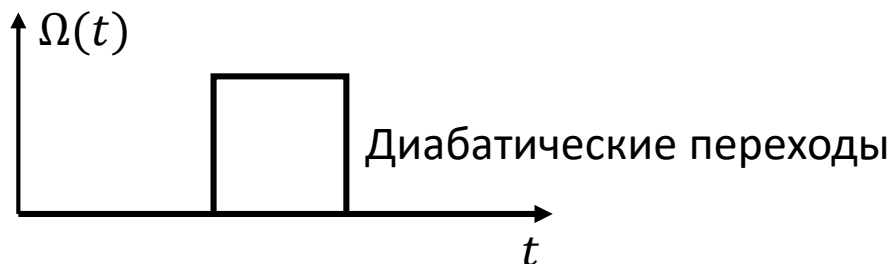
б) населённость кубита в зависимости от длительности задержки между возбуждением и считыванием

Фазовые ошибки и гауссовы импульсы

Трёхуровневая модель для трансмона (представление вращающейся волны)

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} 0 & \Omega(t) & 0 \\ \Omega^*(t) & \Delta & \sqrt{2}\Omega(t) \\ 0 & \sqrt{2}\Omega^*(t) & 2\Delta + \delta \end{pmatrix}$$

↑
 Переходы $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$
 Утечка из
 вычислительного
 подпространства +
 фазовые ошибки



$\Omega(t) = I(t) + iQ(t)$ Гауссовы DRAG импульсы

$$I(t) = \begin{cases} A \left(e^{-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}} - e^{-\frac{T_p^2}{8\sigma_t^2}} \right), & \text{если } |t| < \frac{T_p}{2}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$Q(t) = -\alpha \frac{\dot{I}(t)}{\delta} \quad \sigma_t = 6 \text{ нс}, T_p = 24 \text{ нс}$$

$$\hat{U}_{\text{DRAG}} = e^{\frac{I(t)}{2\delta}(\hat{a} - \hat{a}^\dagger)} \quad \hat{H}' = \hat{U}^\dagger \hat{H} \hat{U} + i\hbar \hat{U}^\dagger \frac{\partial \hat{U}}{\partial t}$$

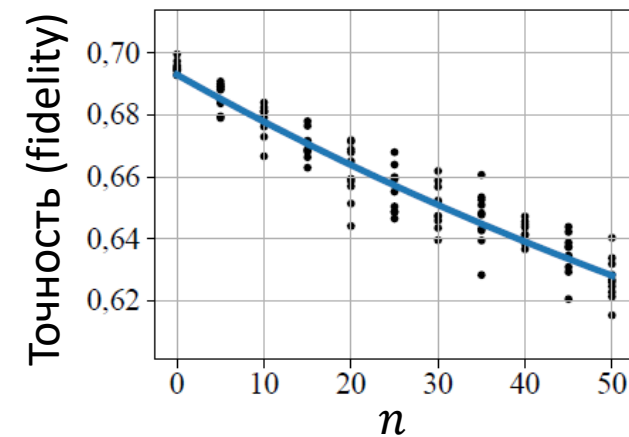
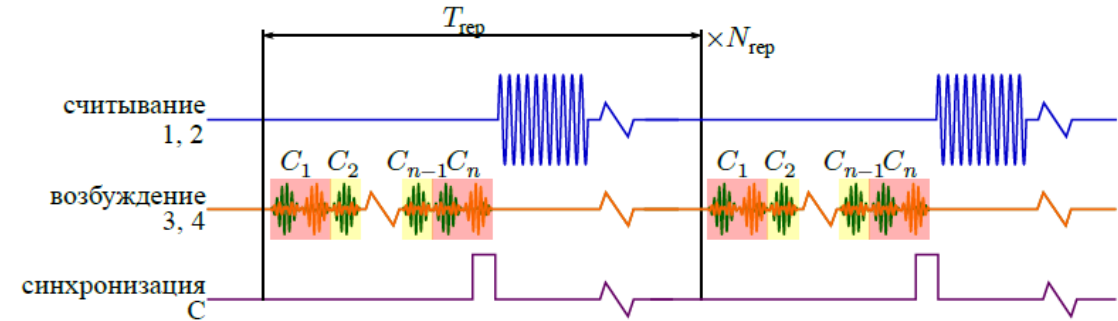
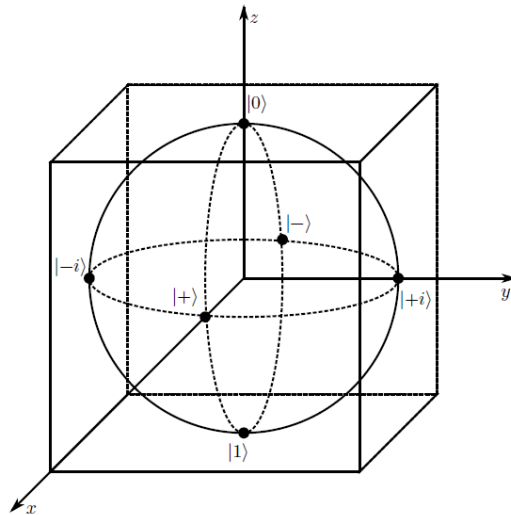
Диабатические переходы

$$\frac{\hat{H}'}{\hbar} = \begin{pmatrix} 0 & I - iQ & \frac{\sqrt{2}I^2}{8\delta} \\ I + iQ & \Delta - \frac{I^2}{2\delta} & -i(Q + \frac{\dot{I}}{\delta}) \\ \frac{\sqrt{2}I^2}{8\delta} & i(Q + \frac{\dot{I}}{\delta}) & 2\Delta + \delta + \frac{3I^2}{2\delta} \end{pmatrix}$$

↑
 Нет утечки при $\alpha = 1$

Рандомизированное тестирование (Randomized benchmarking)

Рандомизированное тестирование операций из группы Клиффорда:
Группа Клиффорда: нормализатор группы Паули (группа вращений куба)



$$\langle \mathcal{F} \rangle(1) = 0.995$$

Группа Клиффорда является 2-дизайном: $\langle \mathcal{F} \rangle(n) \sim e^{-\langle \mathcal{F} \rangle(1)n}$

880

ke@sci.lebedev.ru – <http://www.quantum-electron.ru>

«Квантовая электроника», 48, № 10 (2018)

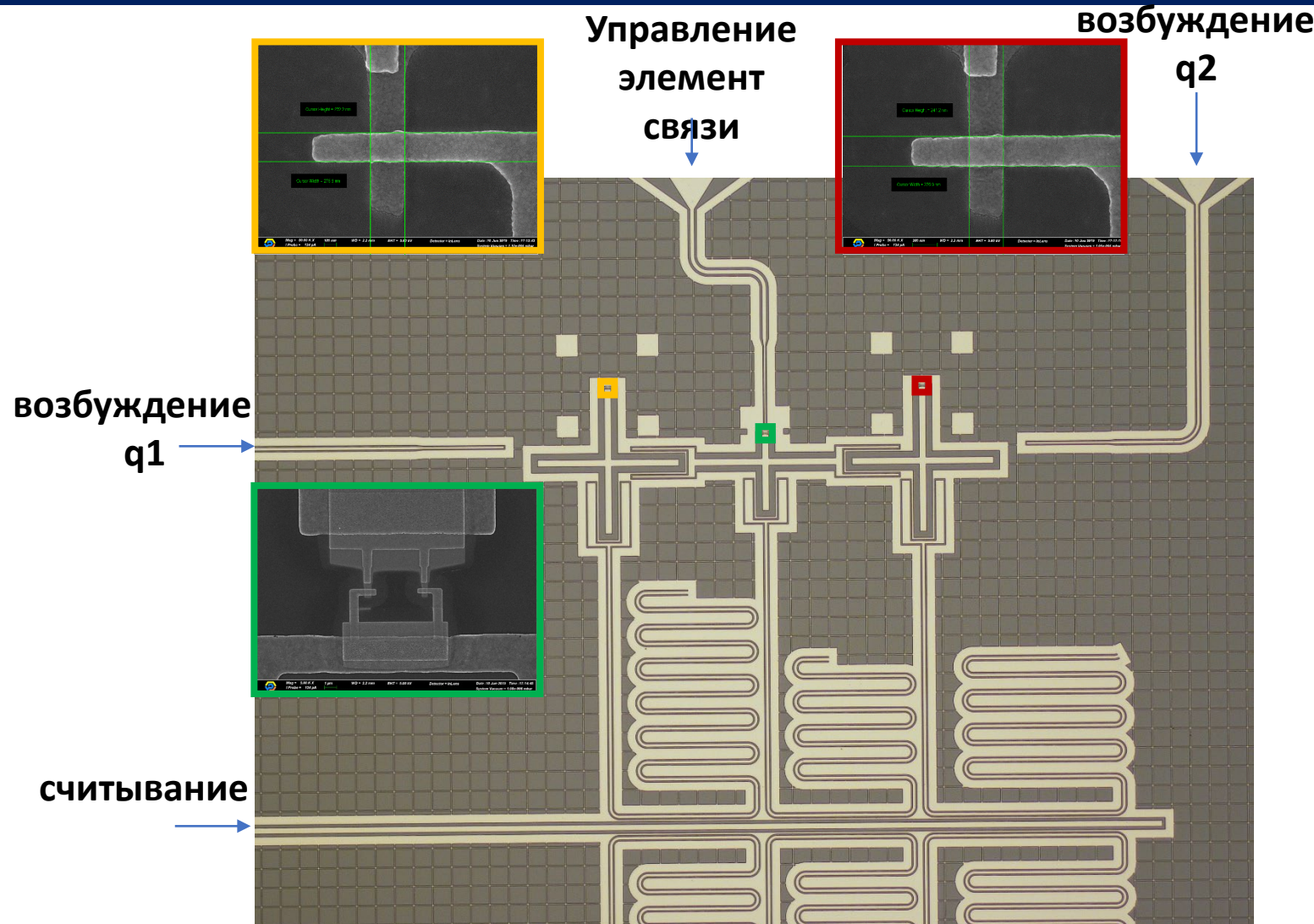
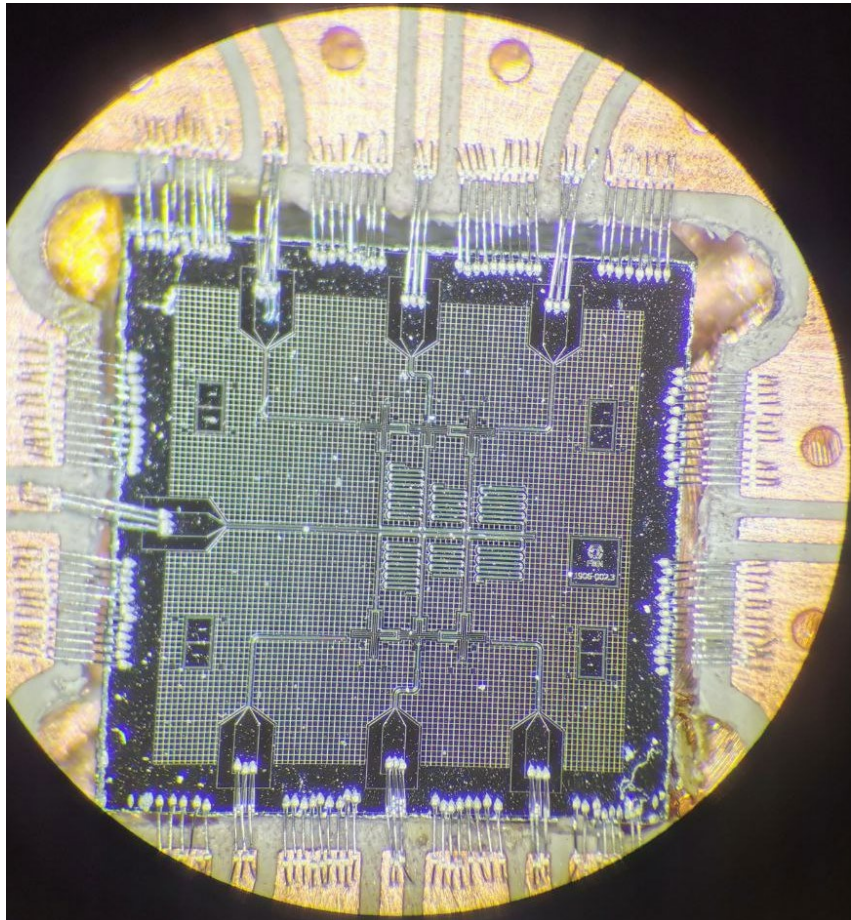
Разработка сверхпроводящих кубитов в России

И.С.Беседин, Г.П.Федоров, А.Ю.Дмитриев, В.В.Рязанов

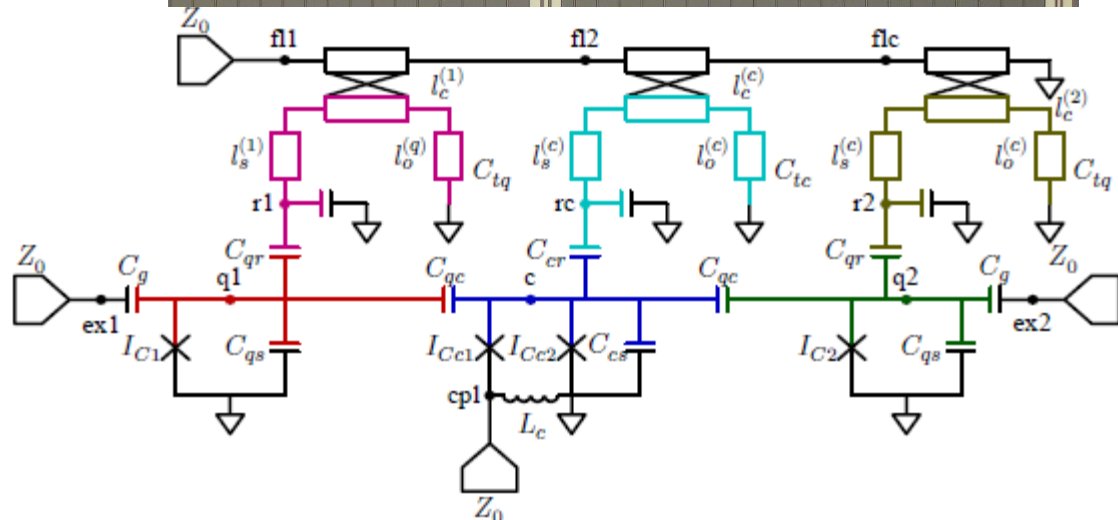
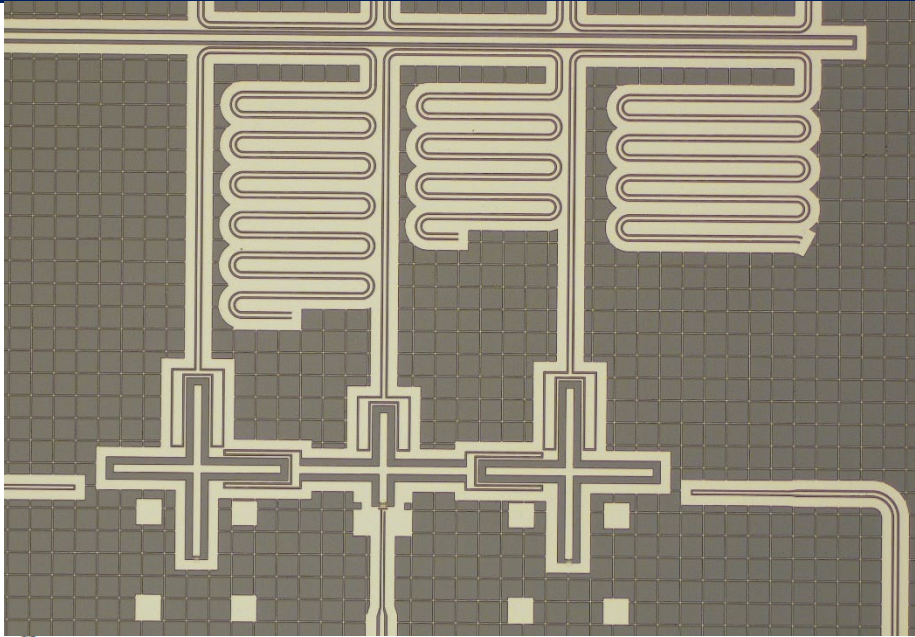
Part 4

Двухкубитный квантовый процессор

Образец



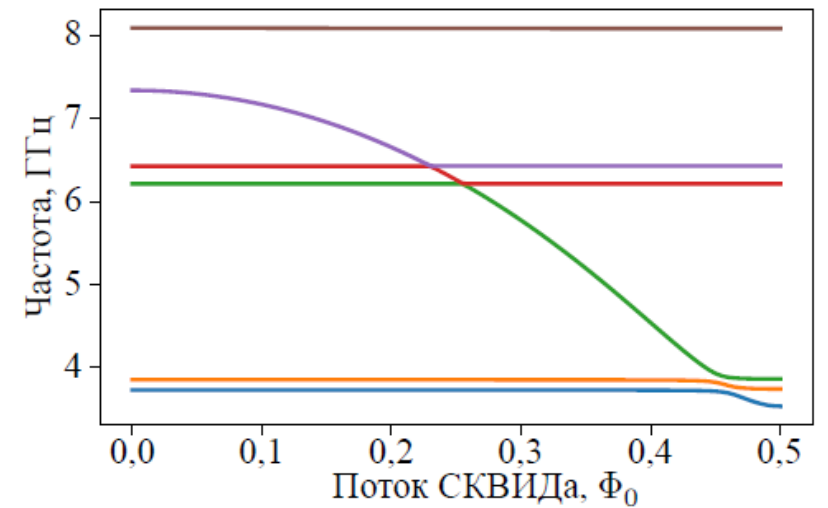
Модель электрической цепи и Гамильтониан



Слабо ангармонические осцилляторы:

- Заменяем SIS линейризованной индуктивностью
- Находим линейные моды
- Теория возмущений по нелинейности SISов

$$\hat{H}^D/\hbar = \sum_m \omega_m \hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m + \frac{1}{2} \sum_{m,n} K_{mn} \hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m \hat{a}_n^\dagger \hat{a}_n.$$



Аналогичный подход:
“QuCat”, “pyEPR”

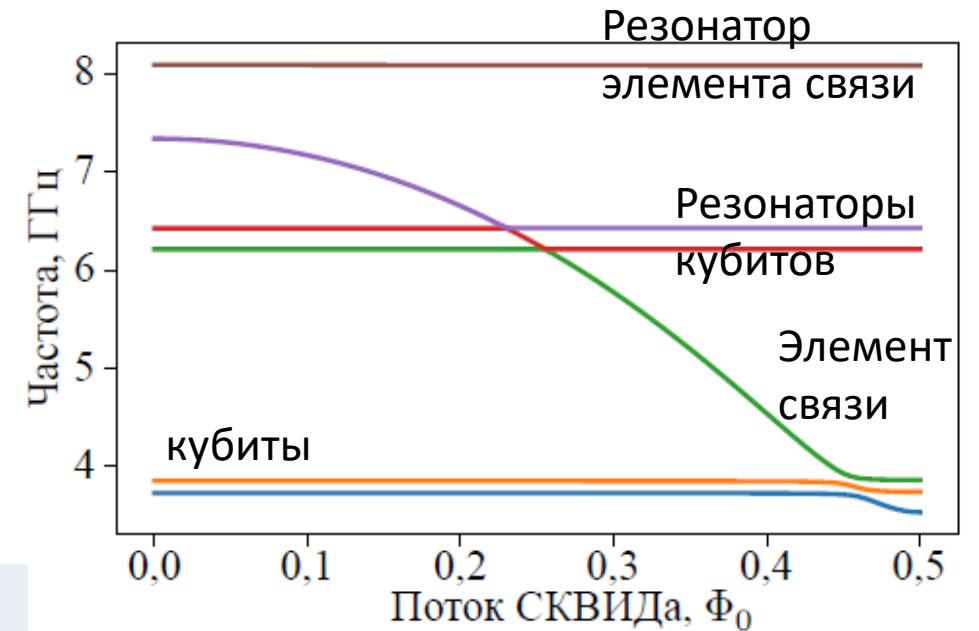
Параметры Гамильтониана

$$\hat{H}^D / \hbar = \sum_m \omega_m \hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m + \frac{1}{2} \sum_{m,n} K_{mn} \hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m \hat{a}_n^\dagger \hat{a}_n.$$

$n = m \in q, K_{mn}$ ангармонизмы
 $n \in q, m \in r, K_{mn}$ дисперсионный сдвиг
 $m \neq n \in q, K_{mn}$ ZZ связь

Матрица кросс-Керровских нелинейностей K_{mn} ($\Phi_0 = 0$)

	0 (q1)	1 (q2)	2 (r1)	3 (r2)	4 (c)	5 (rc)
0 (q1)	-209.598	0.001	-0.759	-0.000	-0.310	-0.004
1 (q2)	0.001	-209.559	-0.000	-0.780	-0.339	-0.004
2 (r1)	-0.759	-0.000	-0.001	-0.000	-0.004	-0.000
3 (r2)	-0.000	-0.780	-0.000	-0.001	-0.007	-0.000
4 (c)	-0.310	-0.339	-0.004	-0.007	-111.716	-2.942
5 (rc)	-0.004	-0.004	-0.000	-0.000	-2.942	-0.019



Радиационные времена релаксации
мод ($\Phi_0 = 0$)

Mode	q1	q2	r1	r2	c	rc
$T_1, \mu\text{s}$	810	680	0.17	0.11	143	0.10

Нестационарный поток в элементе связи

Нестационарные индуктивности

SIS контактов => собственные состояния меняются

$$\hat{H}' = \hat{U} \hat{H} \hat{U}^\dagger - i\hbar \hat{U} \frac{\partial \hat{U}^\dagger}{\partial t}$$

$$\hat{V}^D(t) = -i\hbar \hat{U} \frac{\partial \hat{U}^\dagger}{\partial \Phi_x} \times \frac{\partial \Phi_x}{\partial t}.$$

Параметрическая модуляция (в резонансе с переходом 01 – 10):

$$\Phi_x(t) = \Phi_x^{\text{dc}} + \Phi_x^{\text{ac}}(t) \cos(\omega_m t + \varphi_m(t))$$

$(\Phi_x^{\text{dc}} = 0)$

$$\frac{\hat{H}_{\text{eff}}(t)}{\hbar} = -\frac{\omega_1 + \delta\omega_1}{2} \hat{\sigma}_{z1} - \frac{\omega_2 + \delta\omega_2}{2} \hat{\sigma}_{z2} - \frac{\zeta}{4} \hat{\sigma}_{z1} \hat{\sigma}_{z2} +$$

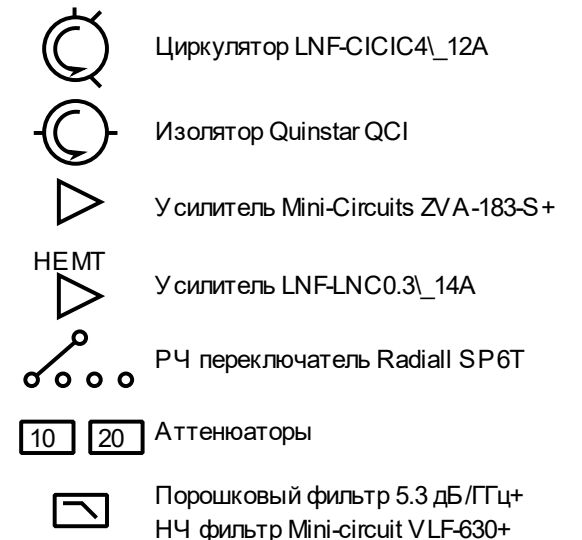
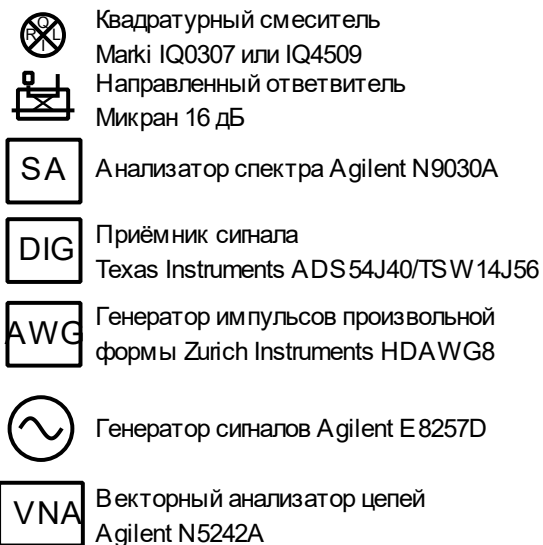
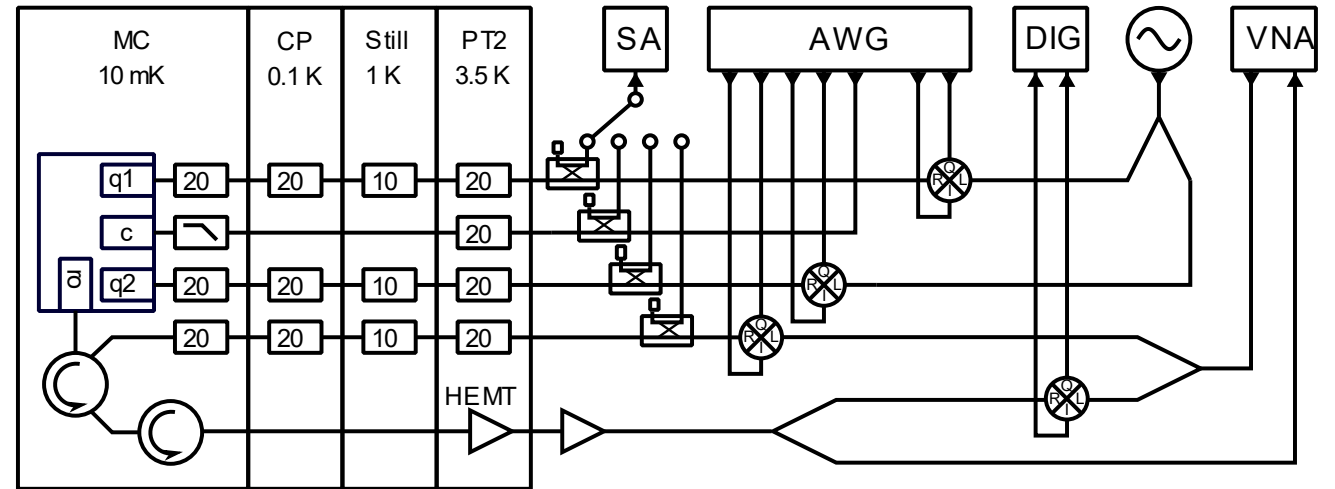
$$\Omega_{\text{ISWAP}} \sin(2\omega_m t + 2\varphi_m(t)) (\hat{\sigma}_{-1} \hat{\sigma}_{+2} + \hat{\sigma}_{+1} \hat{\sigma}_{-2})$$

$$\Omega_{\text{ISWAP}} \sim (\Phi_x^{\text{ac}})^2$$

$\delta\omega_1, \delta\omega_2 \sim (\Phi_x^{\text{ac}})^2$ частоты кубитных мод немного сдвигаются при изменении индуктивности в элементе связи

Микроволновая схема установки

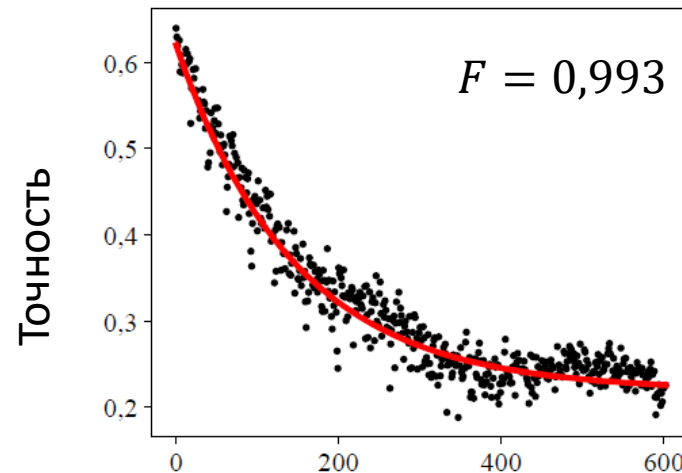
- Квадратурные смесители для повышения и понижения частоты
- Гетеродин общий на оба кубита
- Синхронизация за счёт одного AWG



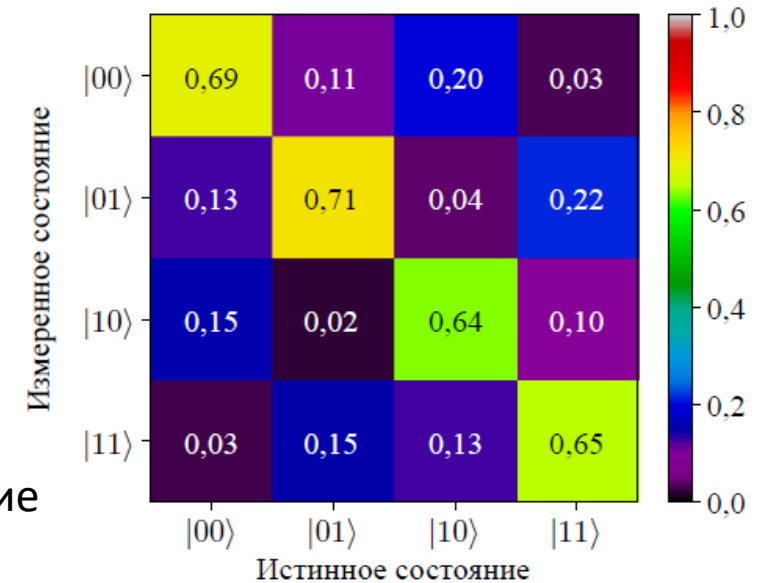
Однокубитные калибровки

- Осцилляции Раби
- Единовременное считывание
- Точная частота кубитов из осцилляций Рамзея
- Калибровка гауссовых импульсов ($\sigma = 8$ нс, $T = 32$ нс)
- Single-shot calibration

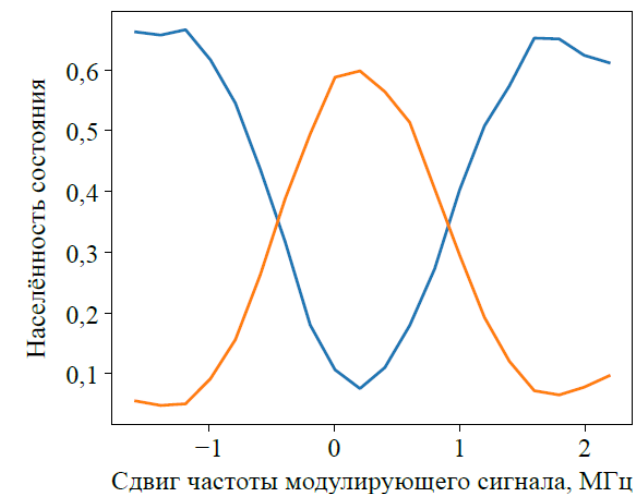
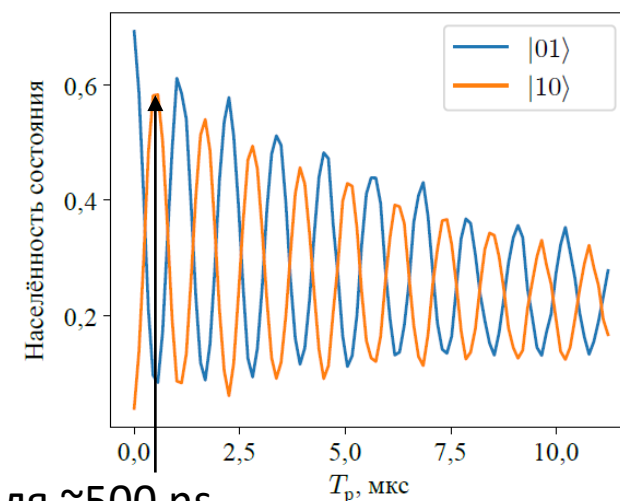
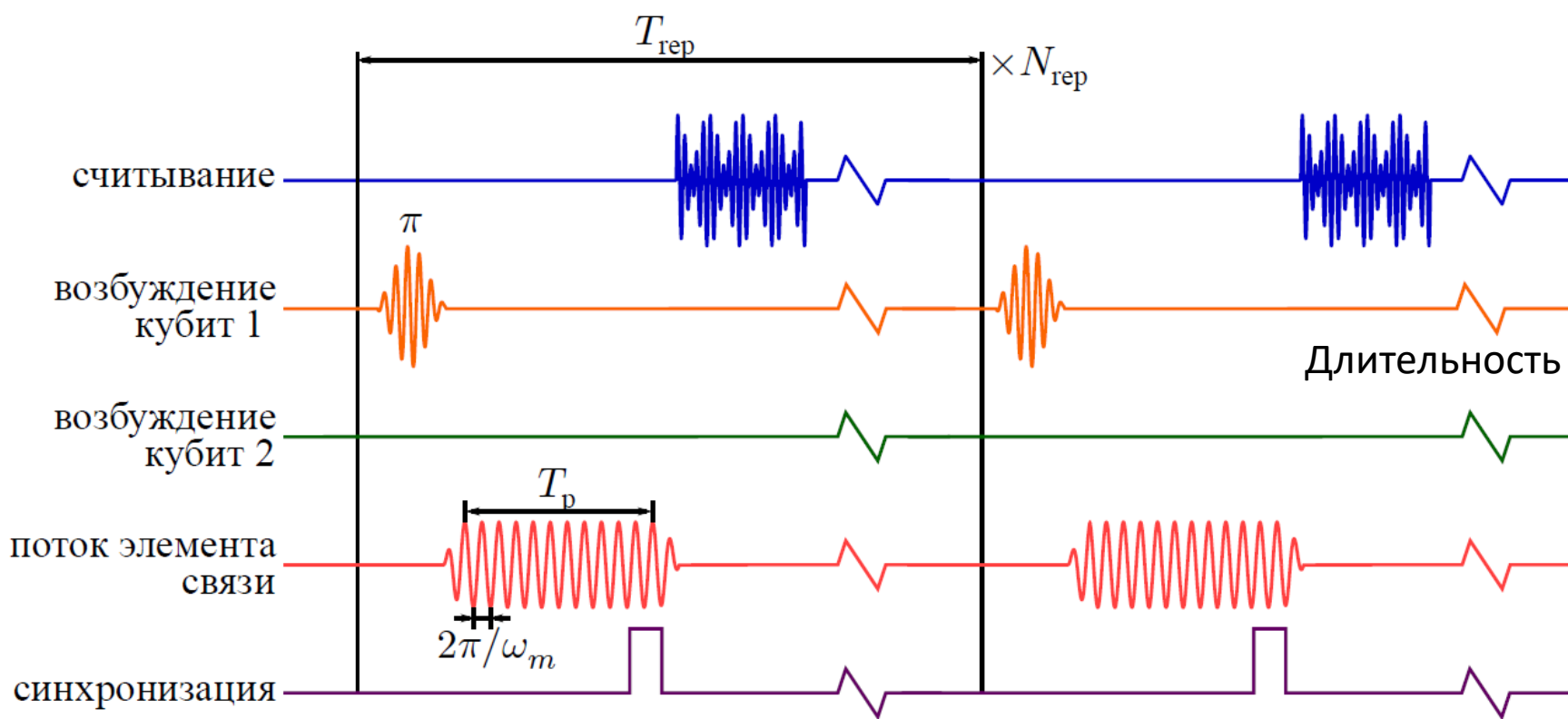
Одновременное однокубитное
рандомизированное тестирование



Длина случайной последовательности

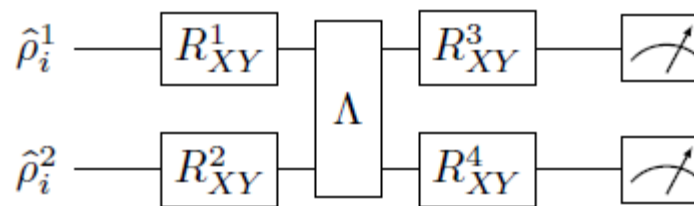


Калибровка двухкубитного вентиля

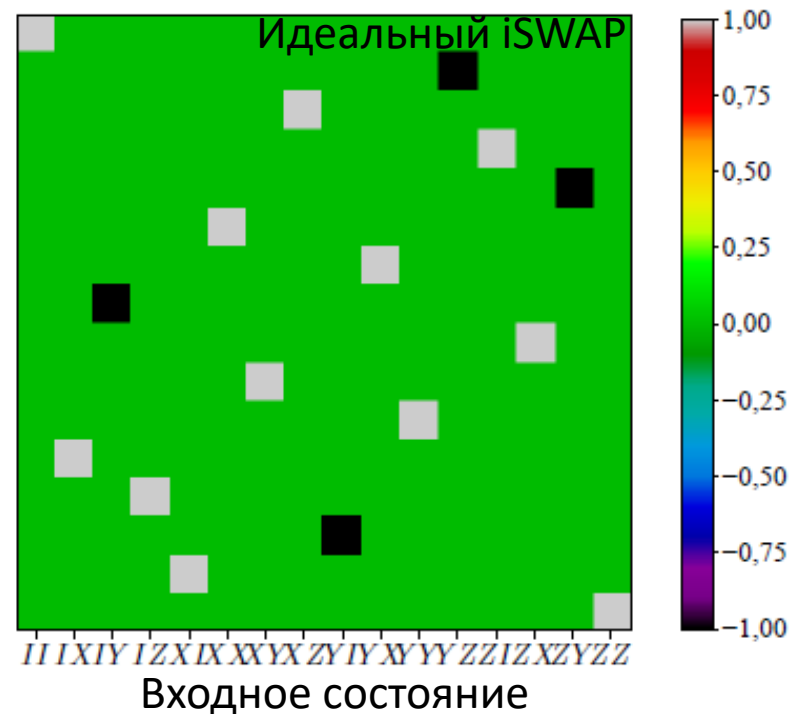
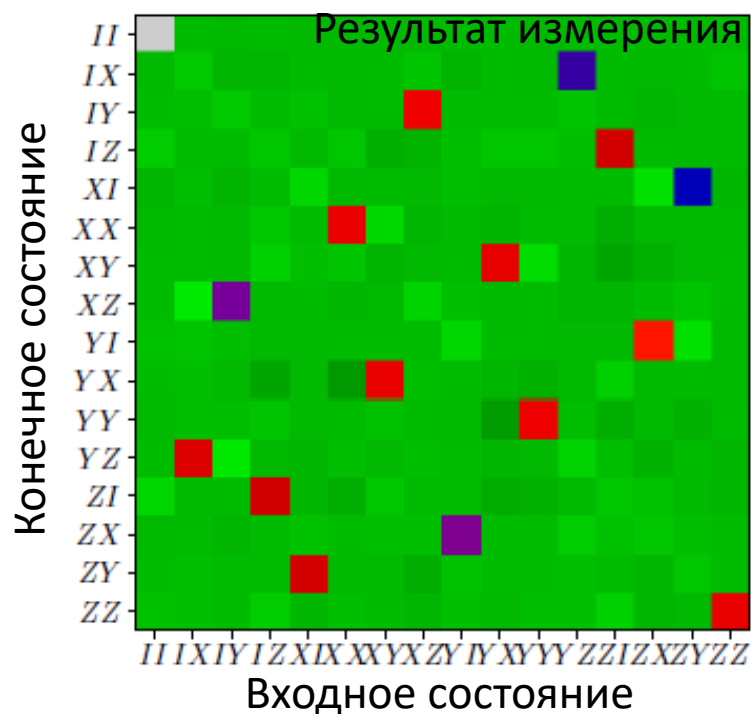


Двухкубитная томография квантового процесса

- Квантовый процесс Λ :
 $\hat{\rho}_{\text{out}} = \Lambda(\hat{\rho}_{\text{in}})$



Квантовый процесс можно представить в базисе матрицы переноса Паули



$$\mathcal{F}_\Lambda = 0.83$$

Алгоритм Гровера

Дано: квантовая процедура U_ω в виде чёрного ящика

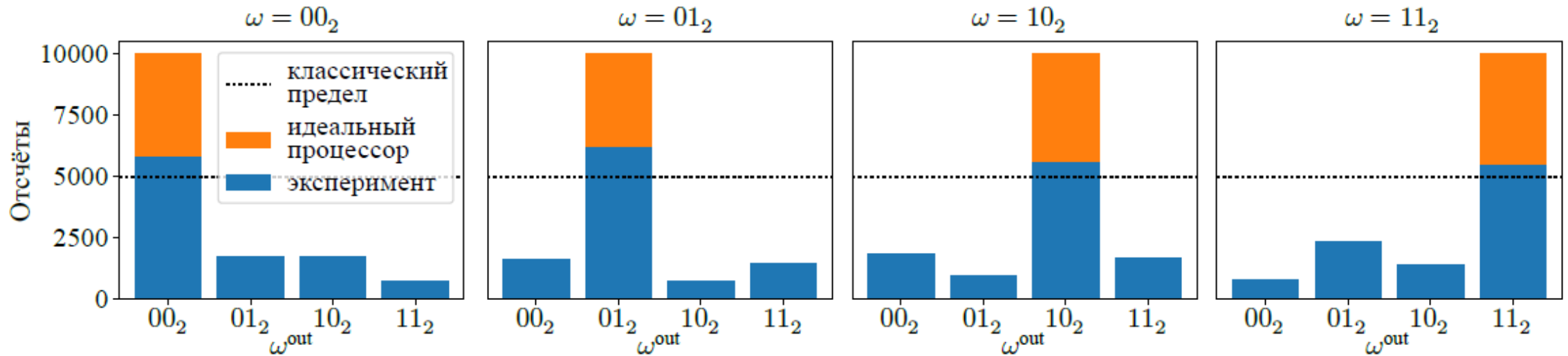
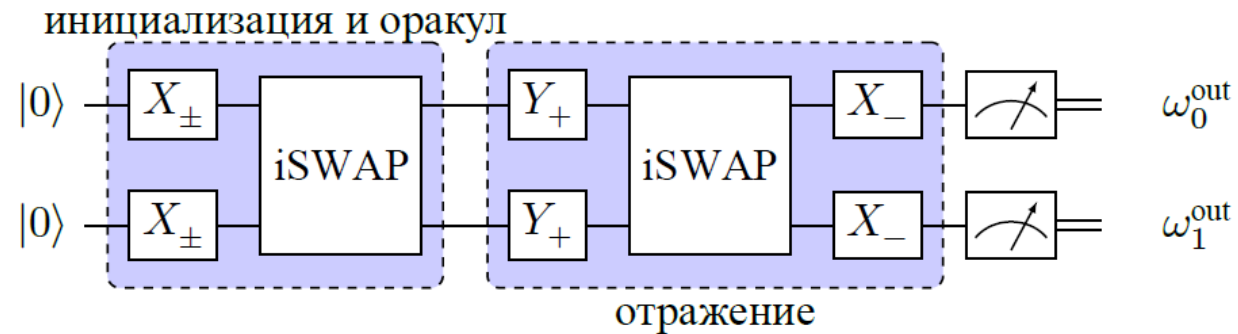
$$U_\omega |x\rangle = \begin{cases} |x\rangle, & x \neq \omega \\ -|x\rangle, & x = \omega \end{cases}$$

Найти: ω

Алгоритм Гровера:

1. Приготовить все кубиты в состоянии суперпозиции.
2. Последовательно выполнять U_ω и квантовую процедуру U_S (гроверовское отражение) $\sim 2^{N/2}$ раз (N = число кубитов).
3. Считать кубиты. Результат считывания -- ω .

Результаты выполнения алгоритма Гровера

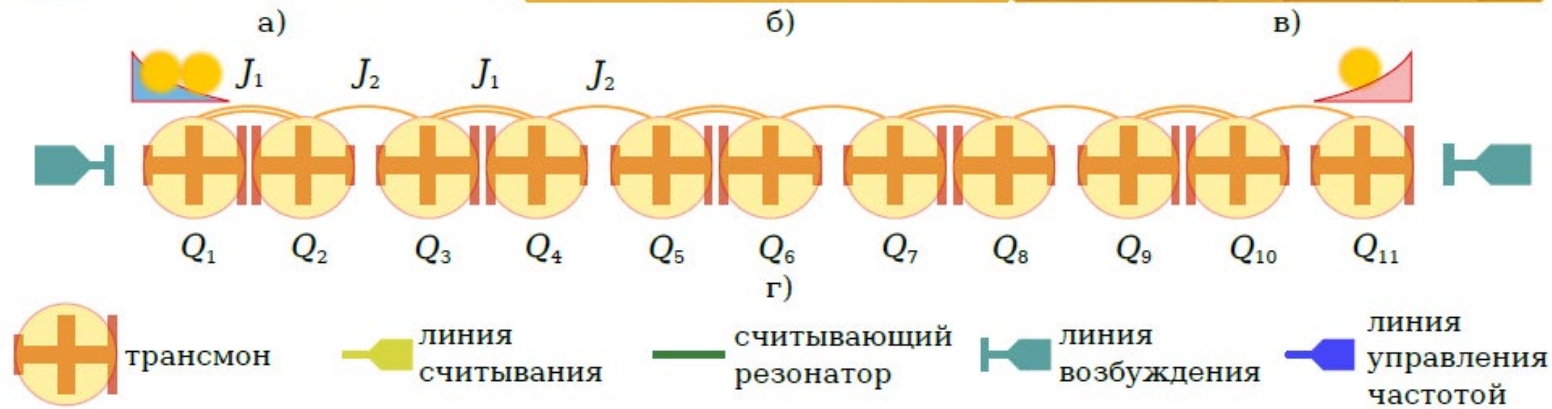
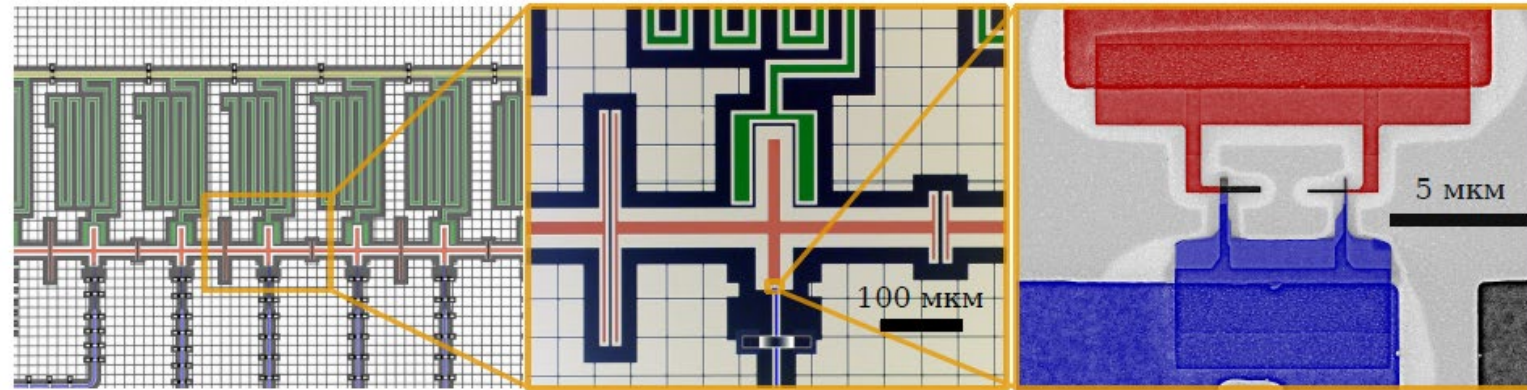


Классический предел: вероятность угадать ω со второй попытки (1/2)

Глава 5

Цепочка трансмонов

Симулятор модели Бозе-Хаббарда



$$\hat{H}_{\text{BH}}/h = \sum_{q=1}^N \left[f_q \hat{n}_q + \frac{\delta_q}{2} \hat{n}_q (\hat{n}_q - 1) \right] + \sum_{q=1}^{(N-1)/2} \left[J_1 \hat{a}_{2q} \hat{a}_{2q-1}^\dagger + J_2 \hat{a}_{2q} \hat{a}_{2q+1}^\dagger \right] + \text{c.c.},$$

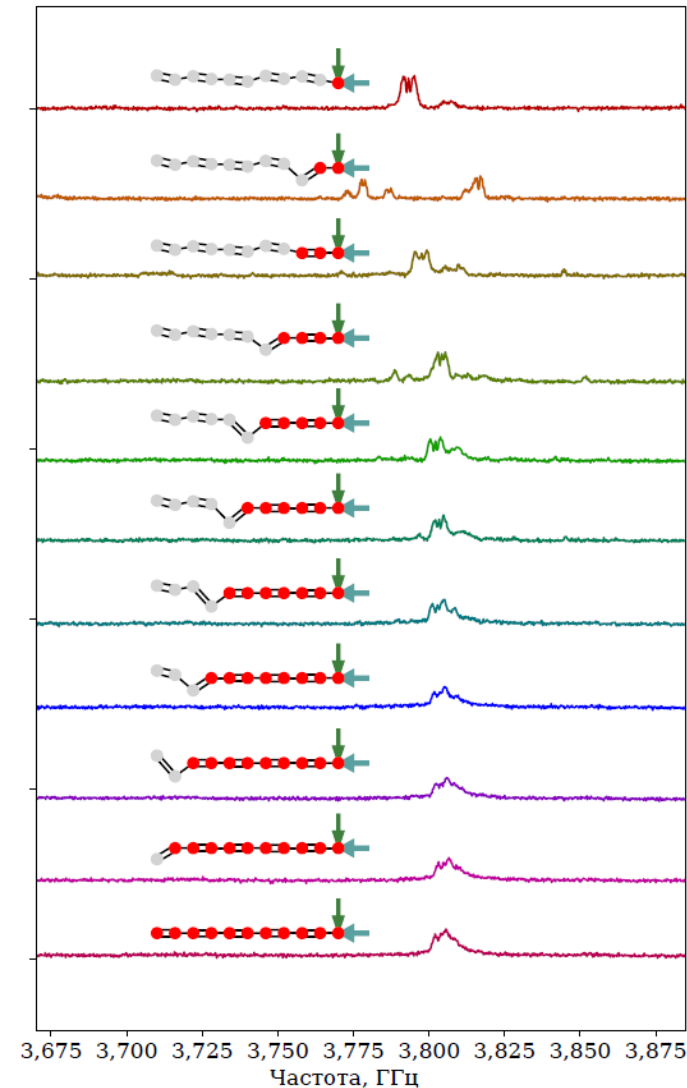
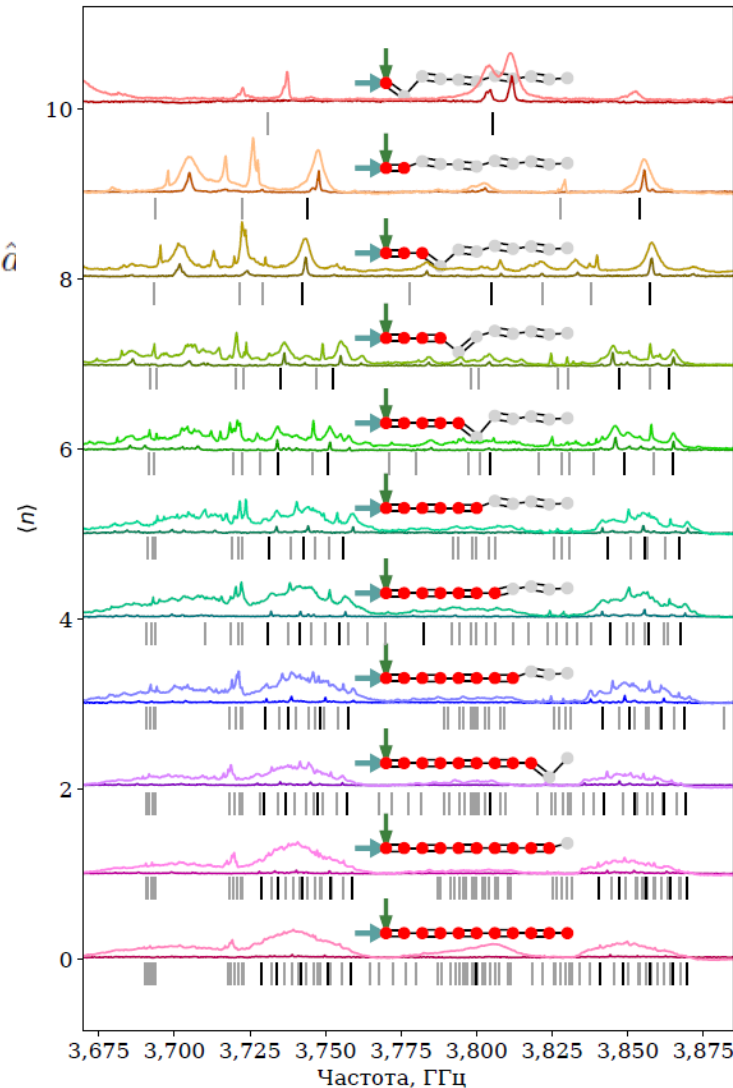
Задача спектроскопии: driven dissipative dynamics

$$\hat{\mathcal{H}}_{\text{RWA}}/h = \sum_{q=1}^N \left[(f_q - f_d)\hat{n}_q + \frac{\delta}{2}\hat{n}_q(\hat{n}_q - 1) \right] + \sum_{q=1}^{(N-1)/2} \left[J_1(\hat{a}_{2q}^\dagger \hat{a}_{2q-1} + \hat{a}_{2q-1}^\dagger \hat{a}_{2q}) + J_2(\hat{a}_{2q}^\dagger \hat{a}_{2q+1} + \hat{a}_{2q+1}^\dagger \hat{a}_{2q}) \right] + \frac{\Omega}{4\pi}(\hat{a}_s + \hat{a}_s^\dagger).$$

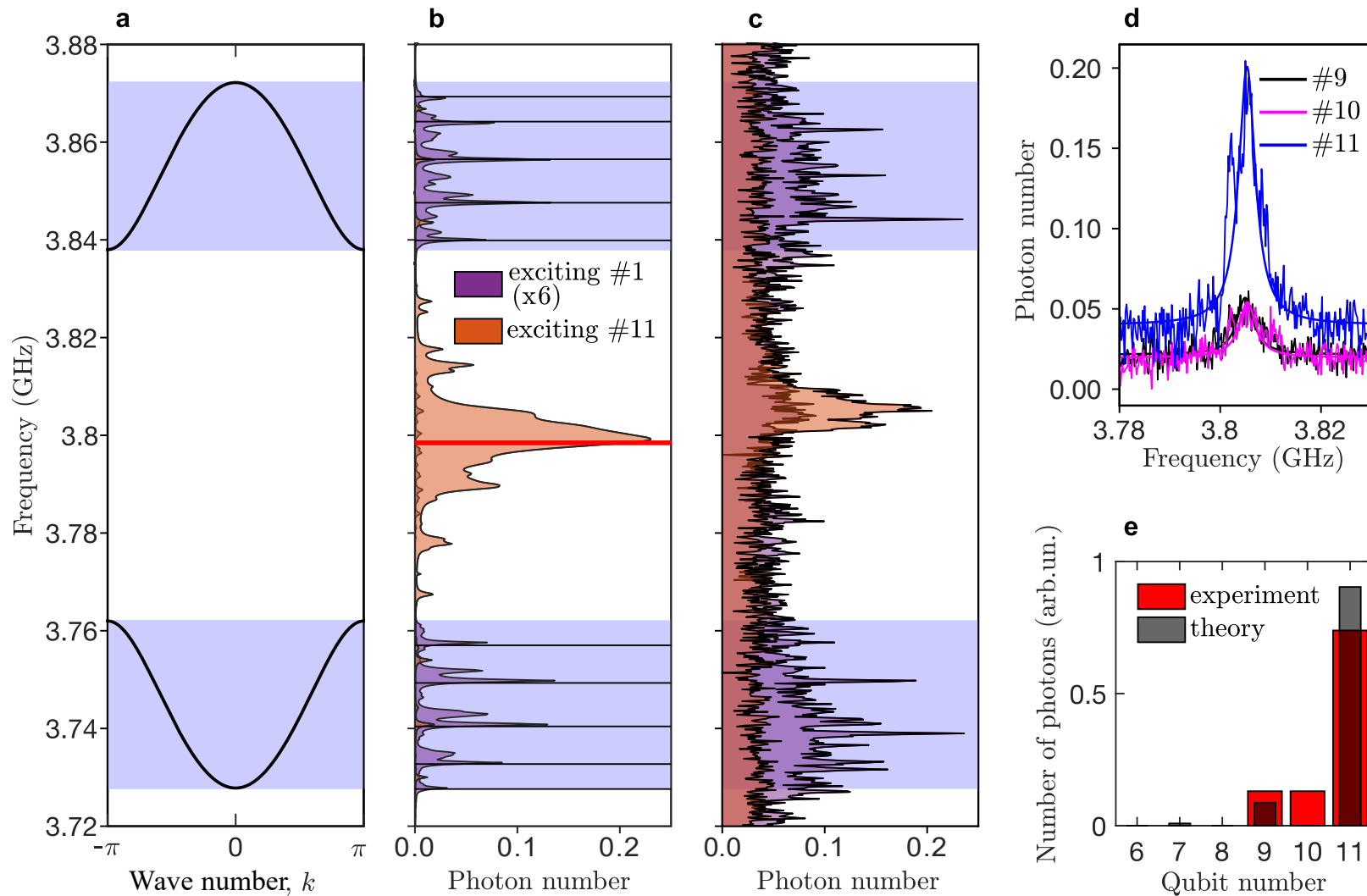
$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} [\hat{\mathcal{H}}_{\text{RWA}}, \hat{\rho}] + \sum_{q=1}^N \gamma_{\downarrow} \mathcal{L}[\hat{a}_q] \hat{\rho} + \gamma_{\uparrow} \mathcal{L}[\hat{a}_q^\dagger] \hat{\rho} + \frac{\gamma_{\phi}}{2} \mathcal{L}[\hat{n}_q] \hat{\rho},$$

$$\mathcal{L}[\hat{c}] \hat{\rho} = \hat{c} \hat{\rho} \hat{c}^\dagger - \frac{1}{2} [\hat{c}^\dagger \hat{c} \hat{\rho} + \hat{\rho} \hat{c}^\dagger \hat{c}]$$

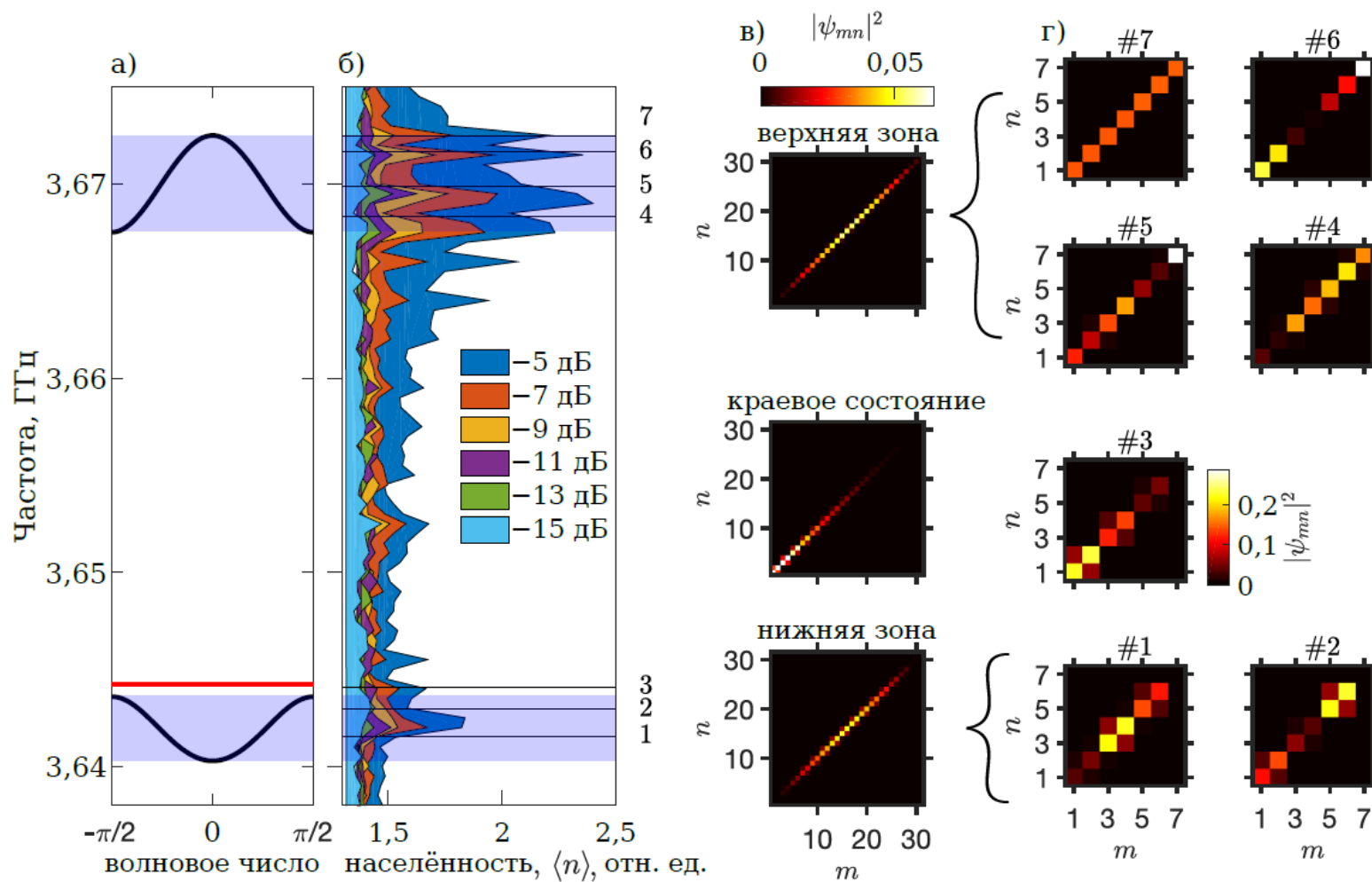
$$\langle n \rangle = \text{Tr} [\hat{\rho}_{\text{ss}} \hat{n}_s]$$



Однофотонный спектр (11 кубитов)



Дублонные зоны



Выводы

1. Разработана математическая модель для связи резонатора на основе копланарного волновода с передающей линией. Математическая модель пригодна для прототипирования устройств, использующих частотно-мультиплексированное считывание с помощью сверхпроводниковых микроволновых копланарных резонаторов.
2. Развита техника проектирования и расчёта характеристик трансмонов связанных как с объёмными, так и с копланарным резонаторами.
3. Развита техника экспериментальных измерений характеристик сверхпроводниковых кубитов и калибровки микроволновых импульсов для реализации квантовых вентиляей.
4. Разработана топология двухкубитной схемы с перестраиваемым элементом связи между кубитами, пригодной для реализации двухкубитного вентиля iSWAP. Продемонстрирована работа алгоритма Гровера.
5. Предложен и исследован сверхпроводниковый квантовый метаматериал, содержащий цепочку из 11 кубитов-трансмонов, реализующий модели Бозе-Хаббарда и Су-Шриффера-Хигера. С помощью микроволновой спектроскопии обнаружен краевой дублон - топологически локализованное связанное состояние двух фотонов.

Спасибо

Alexey Ustinov	BMSTU/VNIIA	RQC	Ioffe Institute
Nikolai Abramov	Ilya Rodionov	Alexey Ustinov	Alexander Poddubny
Ilya Moskalenko	Alina Dobronosova	Gleb Fedorov	
Ivan Tsitsilin	Anastasia Pishimova	Elena Yegorova	
Sasha Grigoryev	Many others...	ISSP RAS	
Vasilisa Usova	ITMO	Valery Ryazanov	
	Maxim Gorlach		

\$\$\$ FPI, Ministry for Education, Rosatom, Russian Science Foundation \$\$\$

Спасибо за внимание!