

О разработке прототипа квантового процессора на основе сверхпроводников

УСТИНОВ Алексей Валентинович

зав. лаборатории Сверхпроводящих метаматериалов НИТУ «МИСиС»
научный руководитель группы «Сверхпроводящие квантовые цепи» РКЦ
профессор Технологического института Карлсруэ, Германия



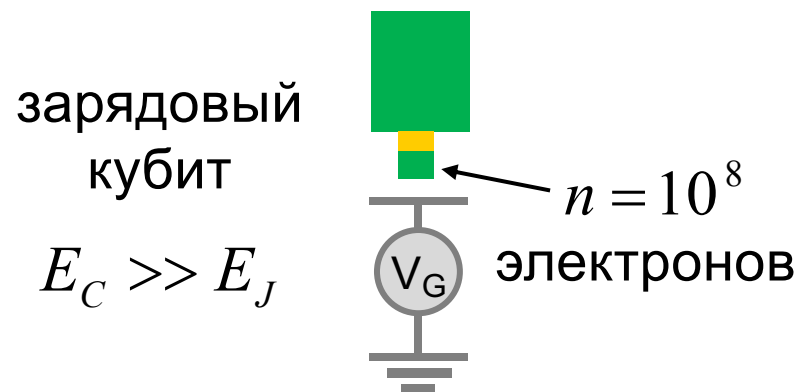
Число электронов и разность фаз

соотношение неопределенностей для сверхпроводника:

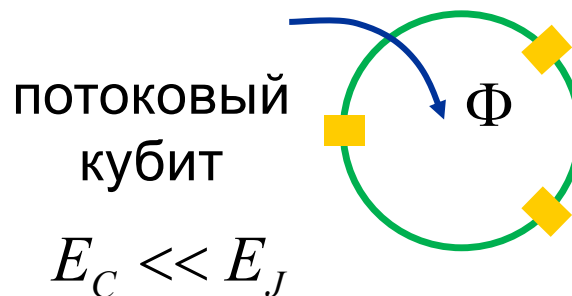
$$\Delta n \cdot \Delta \varphi \geq 1$$

зарядовая энергия $E_C = \frac{e^2}{2C_J}$

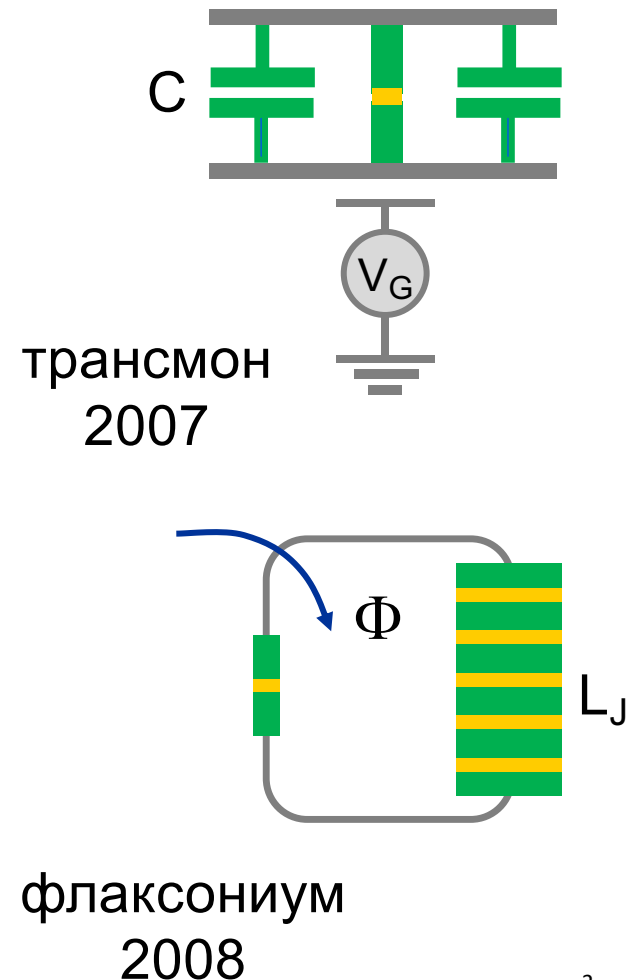
джозефсоновская энергия $E_J = \frac{I_c \Phi_0}{2\pi}$



- Makhlin et al.,
Nature **398**, 305 (1999)
- Nakamura et al.,
Nature **398**, 786 (1999)



- Friedman et al.,
Nature **406**, 43 (2000)
- van der Wahl et al.,
Science **290**, 773 (2000)



Развитие квантовых вычислений на основе сверхпроводников - дорожная РФ карта на 2020-2024 гг.



КВАНТОВЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
РОСАТОМ

задачи на 2020-2024 гг.

- новые типы кубитов
- разработка *квантовых симуляторов*
- масштабирование *квантовых процессоров*
- квантовая коррекция ошибок

ожидаемые результаты в 2024

- сверхпроводниковый квантовый процессор с 30-50 кубитами
- усовершенствованная технология схем
- время релаксации кубитов – 30 мкс или более
- прототип квантового симулятора на основе 30 или более кубитов

2020-2022

4-кубитный квантовый процессор. Точность двухкубитных операций 0,95

2022-2023

8-16-кубитный квантовый процессор. Точность двухкубитных операций 0,95

2024-2025

30-50-кубитный квантовый процессор. Точность двухкубитных операций 0,97

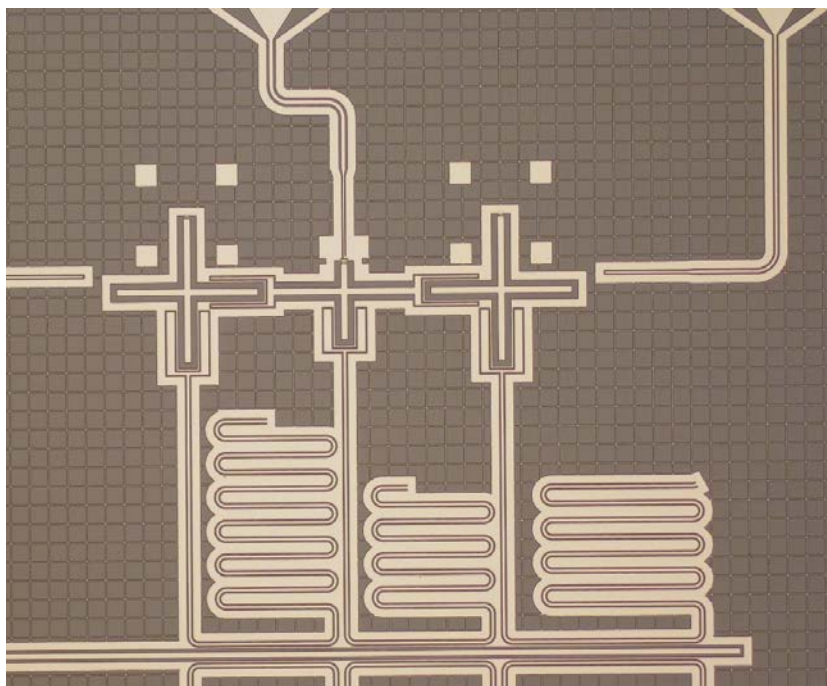
Двухкубитные вентили: текущий статус

трансмоны

МГТУ-2019

$$T_2^* = 20 \text{ мкс}$$

$$F = 86 \%$$

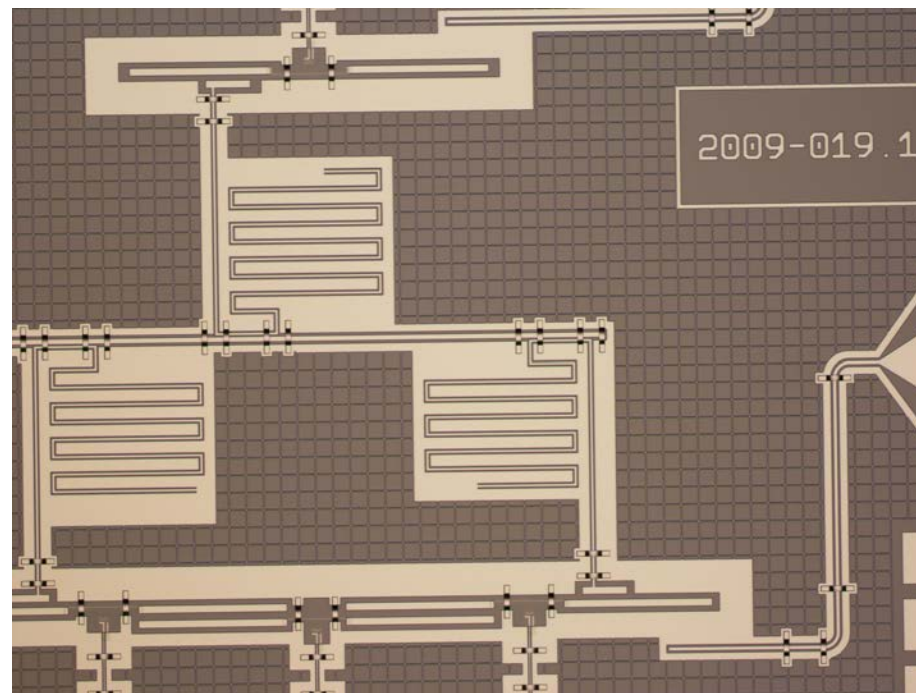


флаксоны

МГТУ-2021

$$T_2^* = 70 \text{ мкс}$$

$$F = 99,2 \%$$



Изготовлено в МГТУ им. Баумана

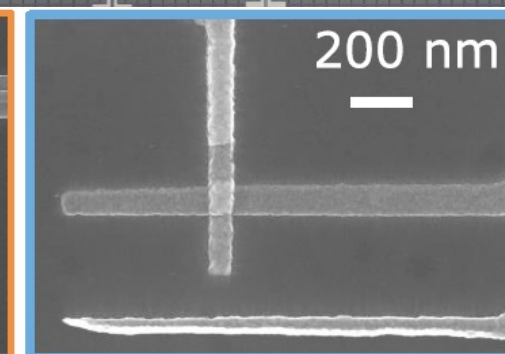
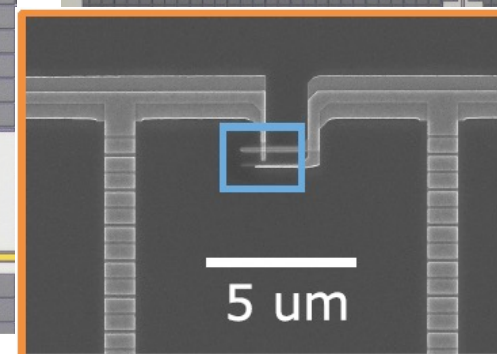
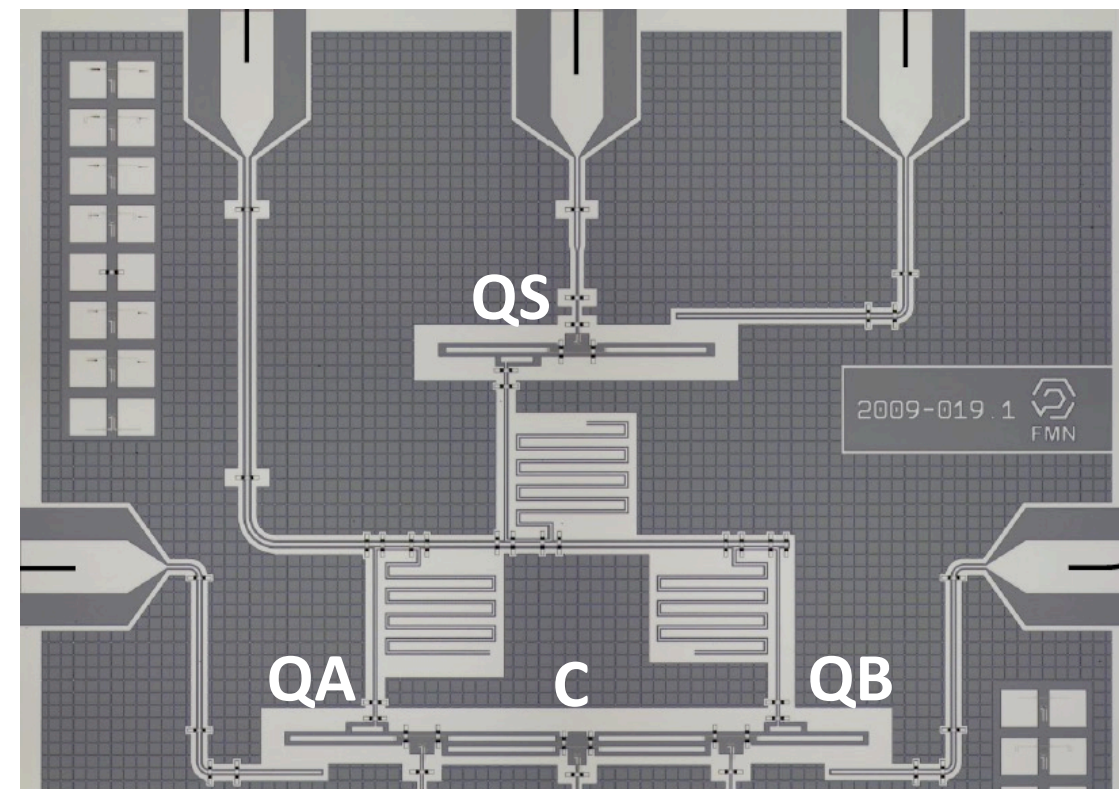
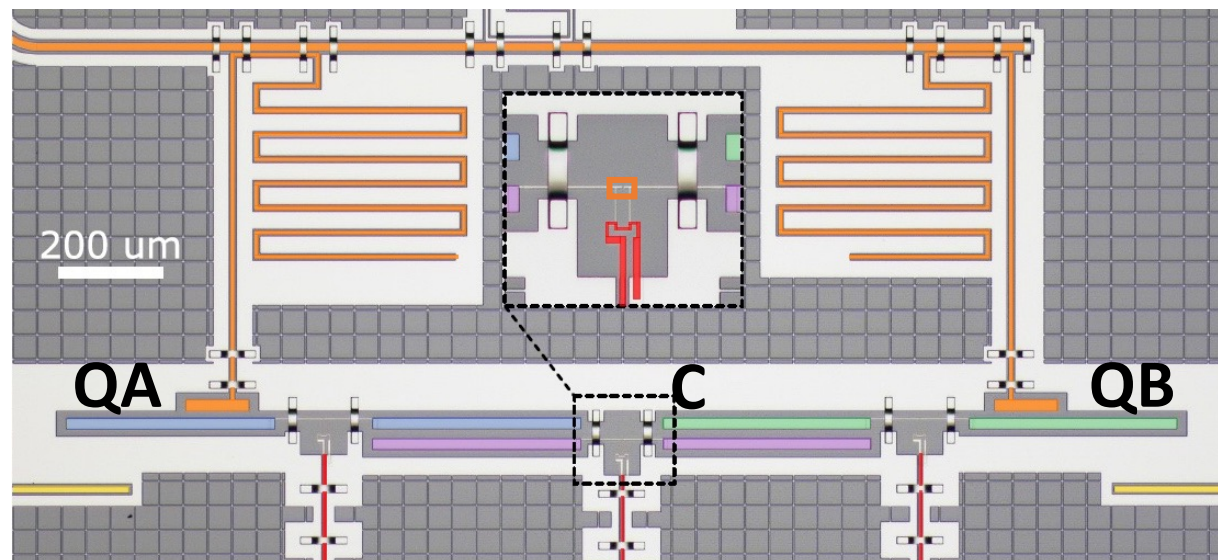
Флаксоныумы

Изготовлено в МГТУ им. Баумана



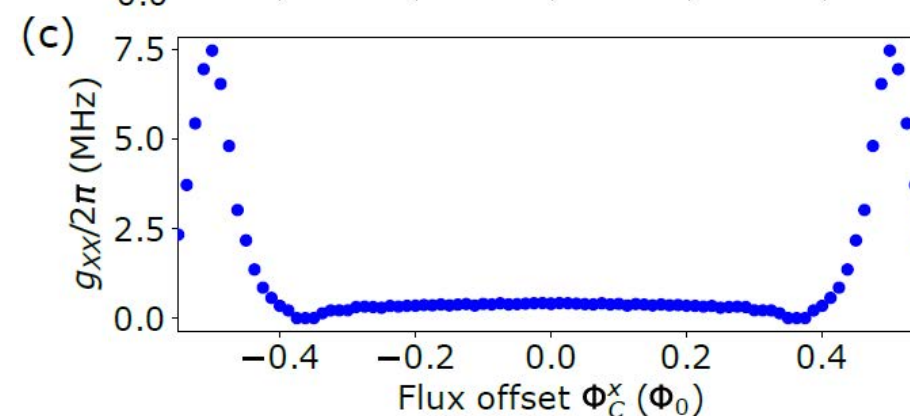
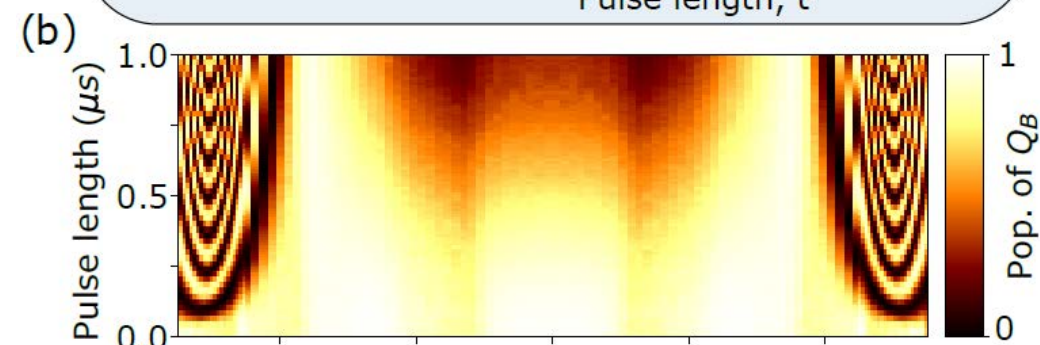
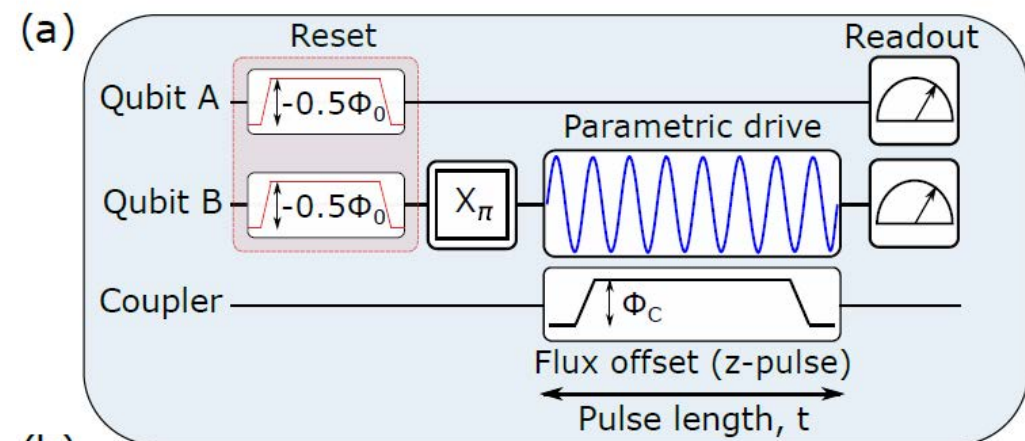
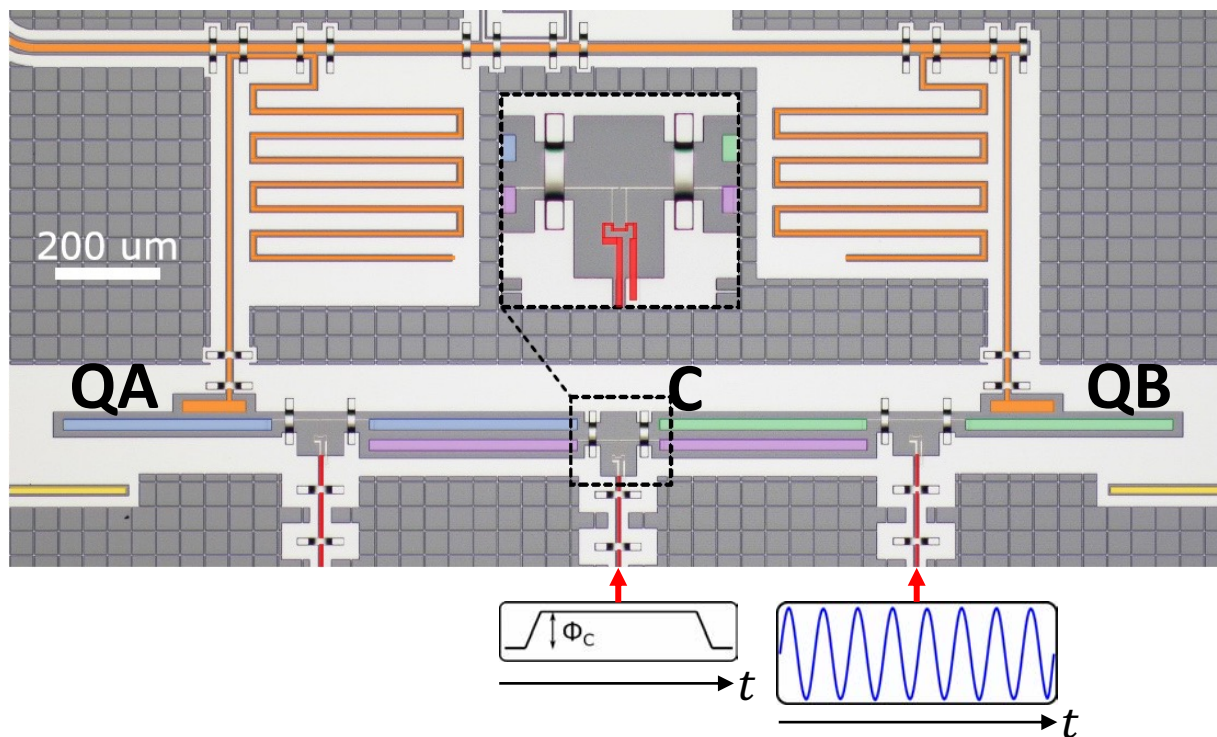
НОЦ ФМН
fmn.bmstu.ru

	QA	QB	QS
f_{01} , ГГц	0,688	0,664	0,750
T_1 , мкс	87	86	172
T_2^* , мкс	51	76	113
T_2^E , мкс	107	93	146



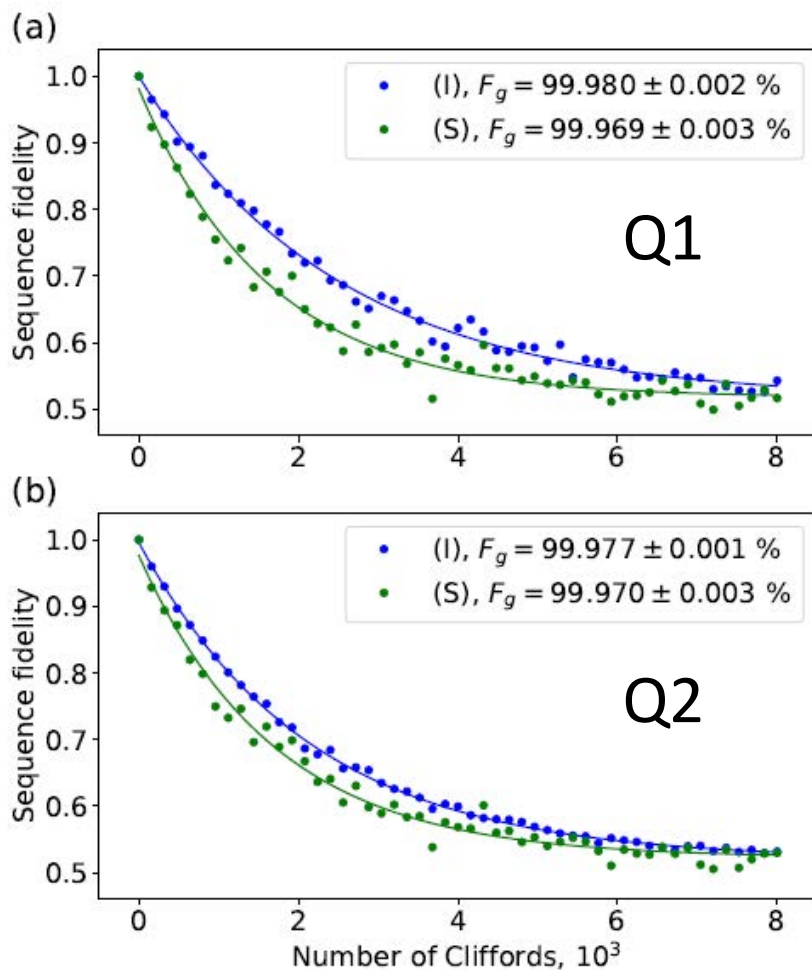
Двухкубитный гейт на флаксониумах

$$U(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos g_{xx}t & ie^{i\varphi} \sin g_{xx}t & 0 \\ 0 & ie^{-i\varphi} \sin g_{xx}t & \cos g_{xx}t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i\zeta_{zz}(t)} \end{pmatrix}$$

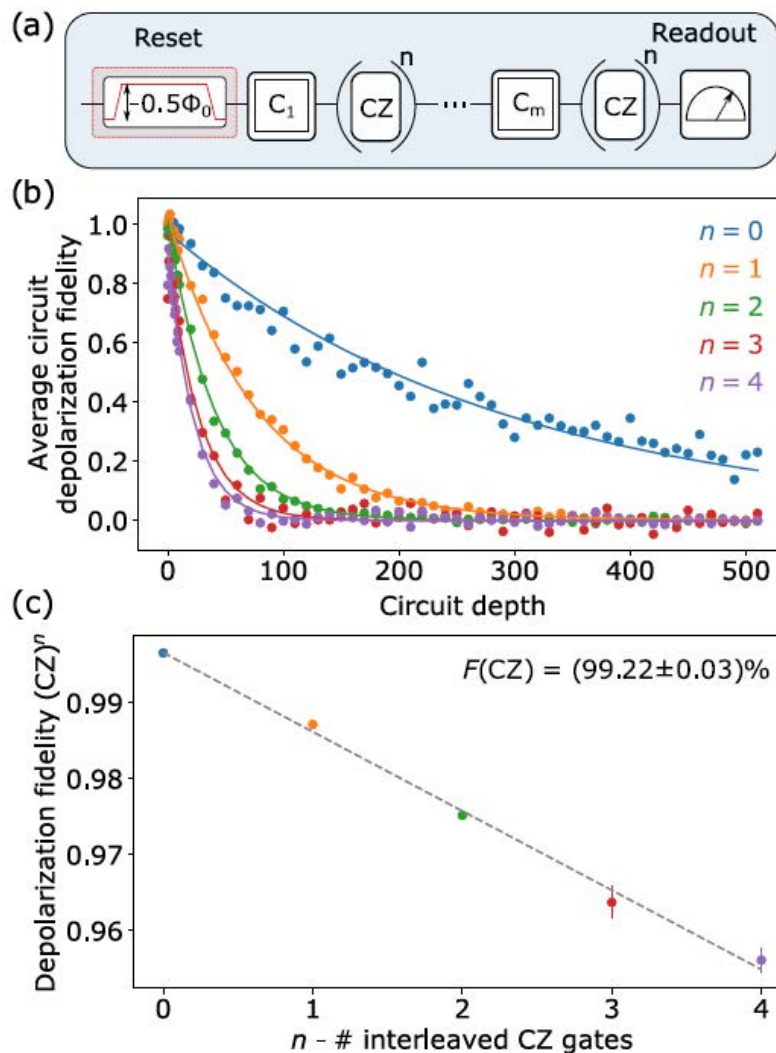


Вентили на флаксоныумах

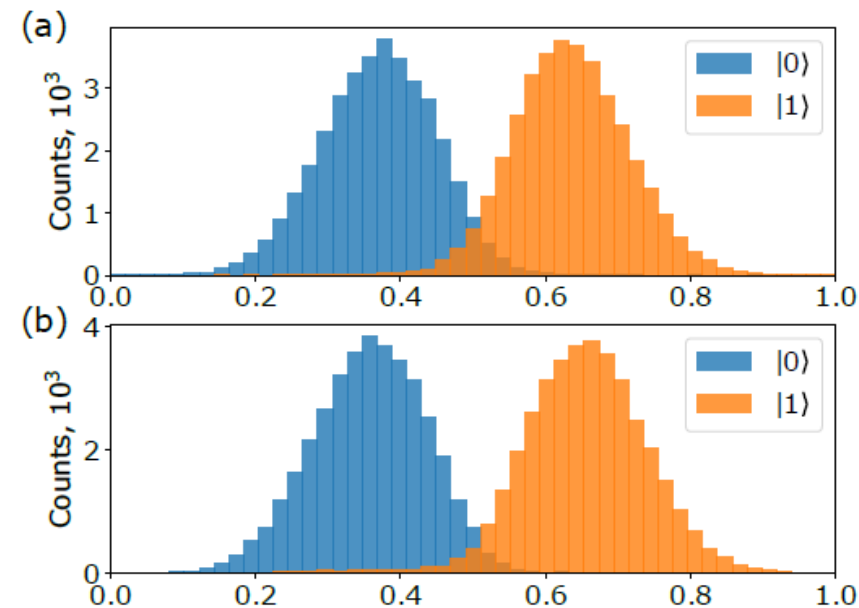
1-кубитные операции



2-кубитные операции



считывание+инициализация



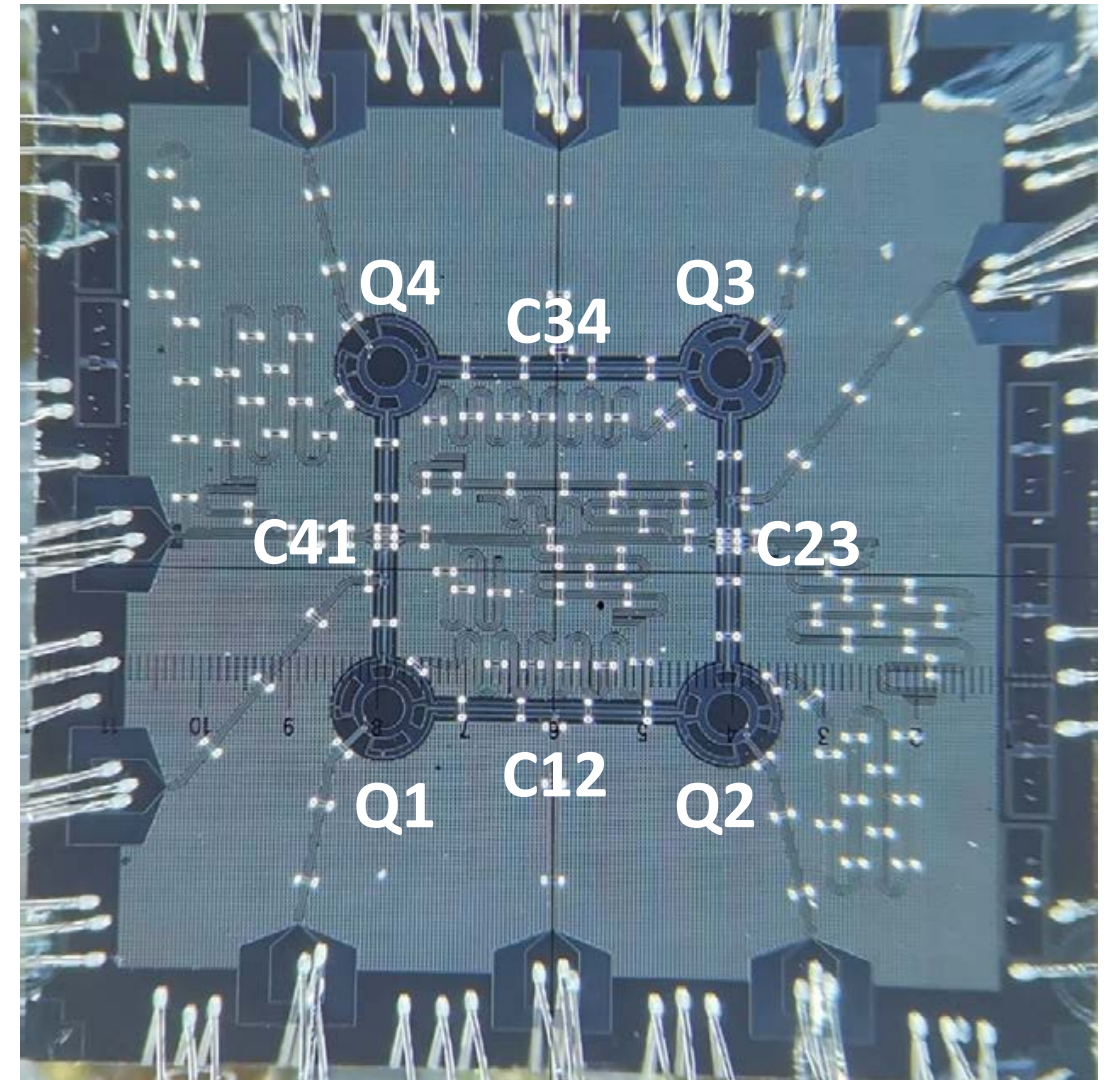
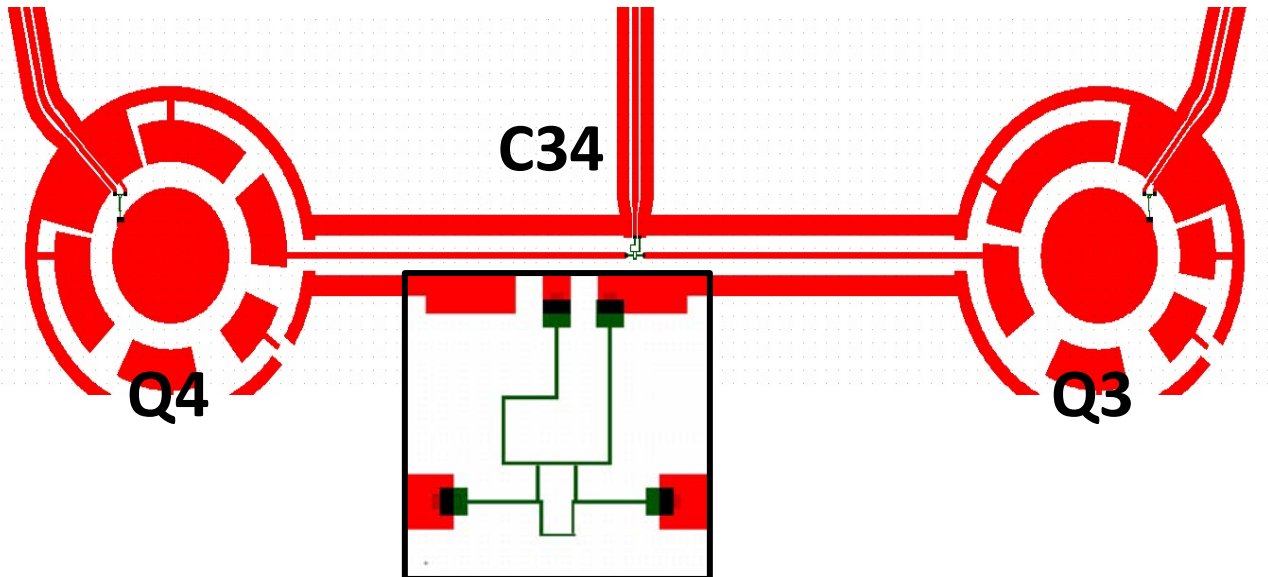
Fidelity операций

	C_1	CZ	RO+INIT
QA	0,9997	0,9922	0,87
QB	0,9997		0,89

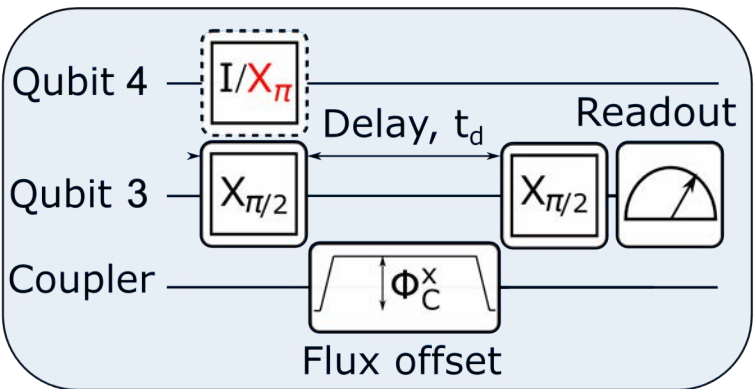
Трансмоны (4-кубитный процессор)

Изготовлен в МФТИ, февраль 2022

	Q1	Q2	Q3	Q4
f_{01} , ГГц	5,282	5,065	5,049	4,933
T_1 , мкс	1,1	1,3	0,9	1,7
T_2^* , мкс	1,5	2,3	1,4	2,0
RO+INIT	0,68	0,73	0,73	0,75



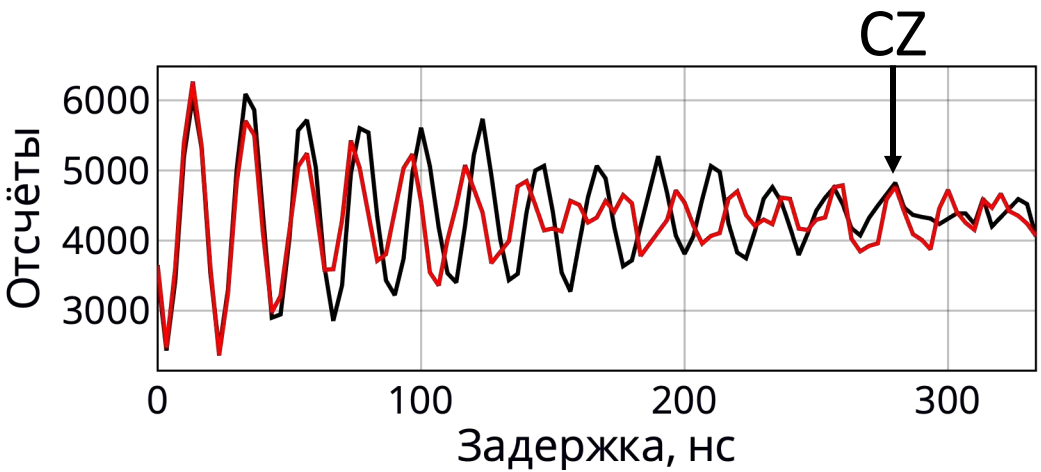
Трансмоны (процессор), двухкубитный гейт



$$U(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i\zeta_{zz}(t)} \end{pmatrix}$$

Операции

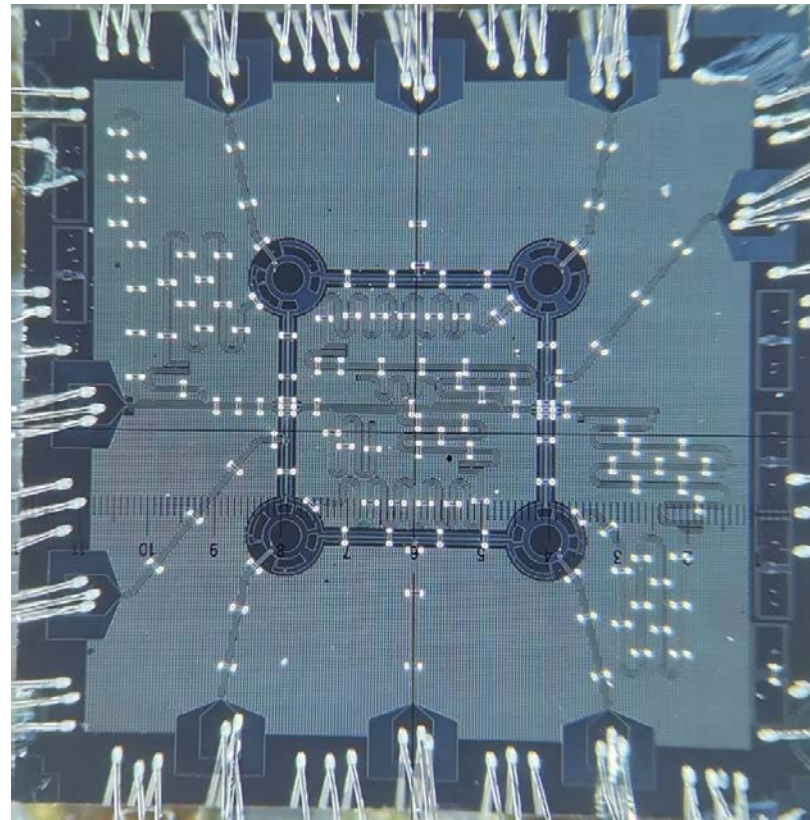
	c_1	CZ	RO+INIT
Q1	+	-	0,68
Q2	+	-	0,73
Q3	+	+	0,73
Q4	+	-	0,75



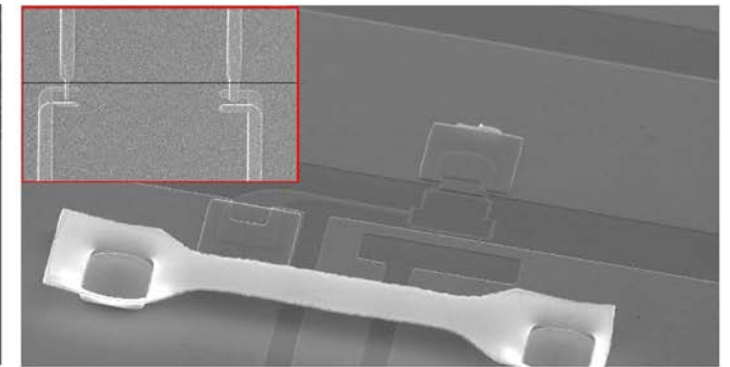
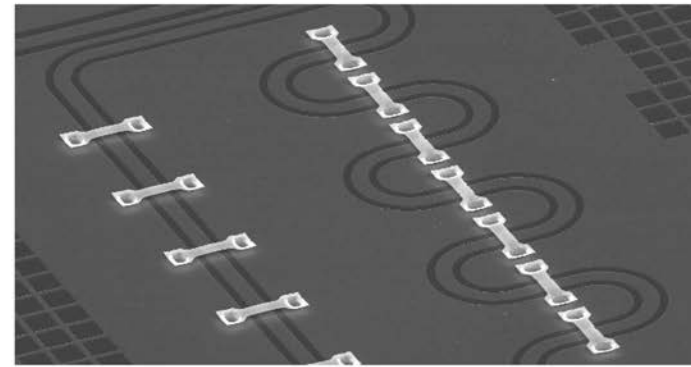
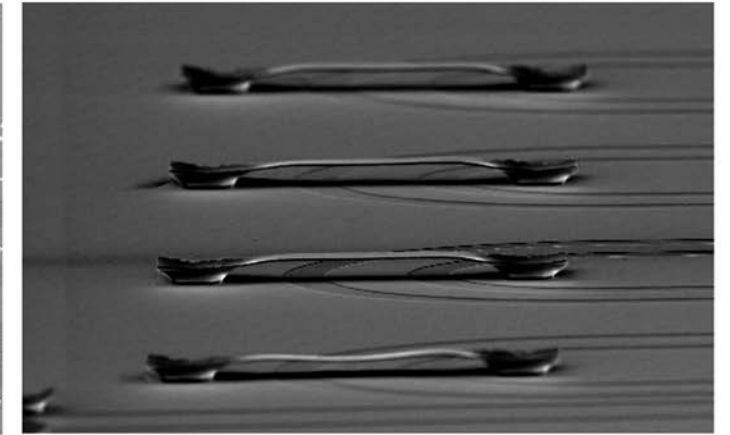
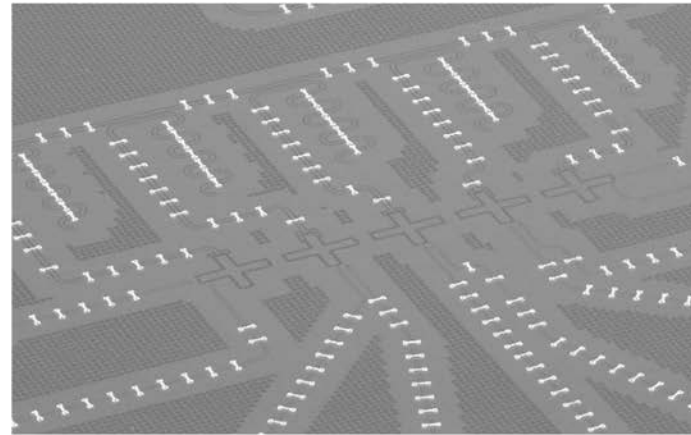
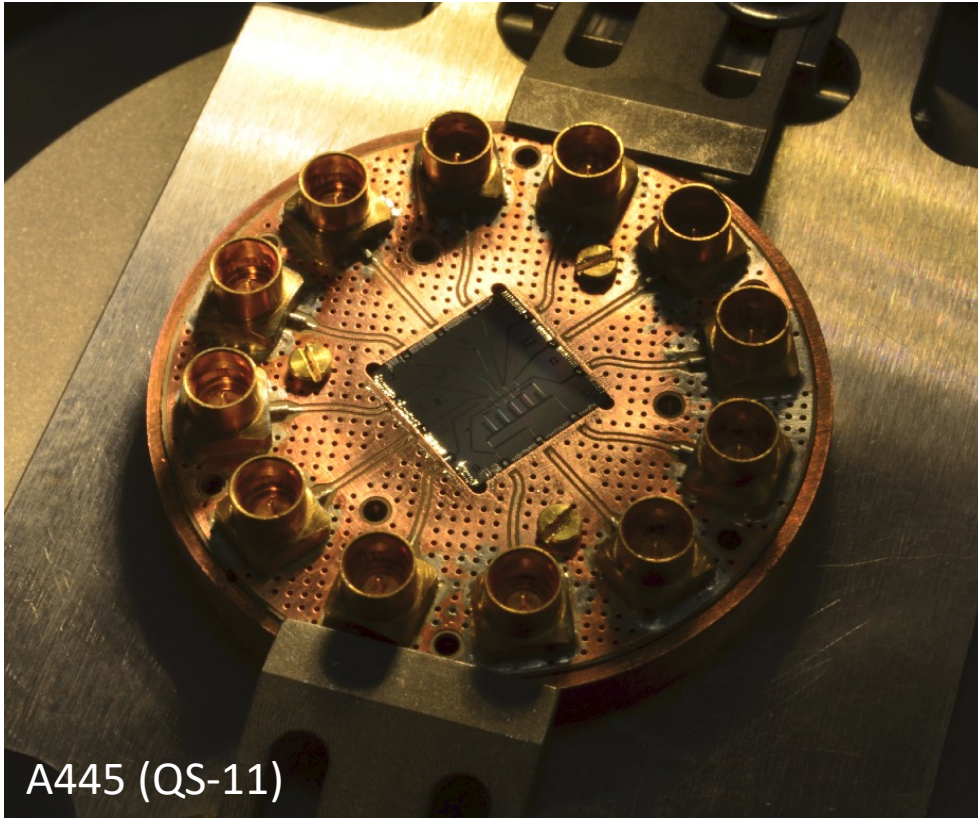
Времена когерентности недостаточны для работы 4-кубитного процессора

4 кубита (статус: апрель 2022)

- дизайн чипа + измерения в МИСиС
- изготовление чипов в МФТИ
- $T_1 \sim 1,5$ мкс, $T_2^* \sim 1,5$ мкс
- более быстрые гейты:
< 50 нс против ~ 500 нс в 2019 г.
- используются эйр-бриджи
- на других чипах МФТИ-2022:
 $T_1 > 10$ мкс

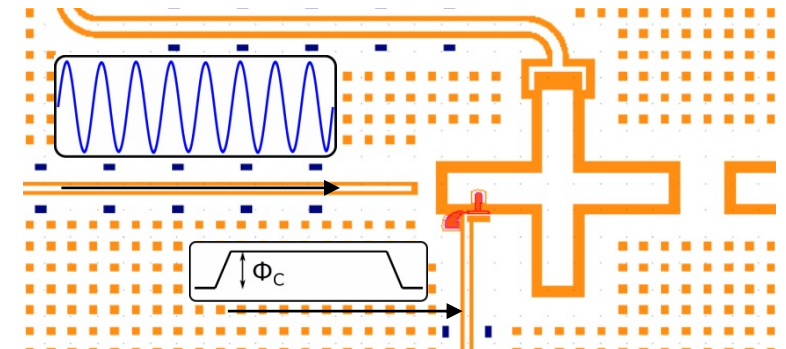


Квантовый симулятор на 5 кубитах



За год:

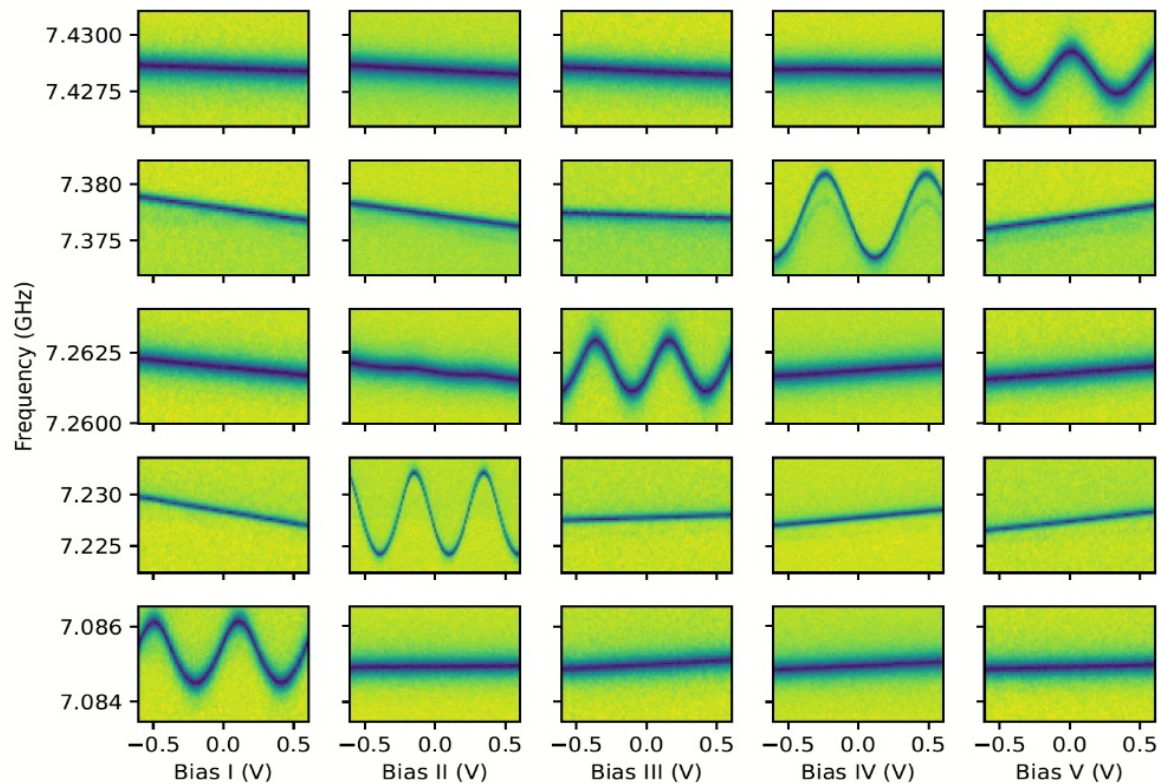
- В МФТИ изготовлено 11 версий образцов
- Времена релаксации увеличены с 200 нс до >10 мкс
- Отработаны двухк. операции и считывание



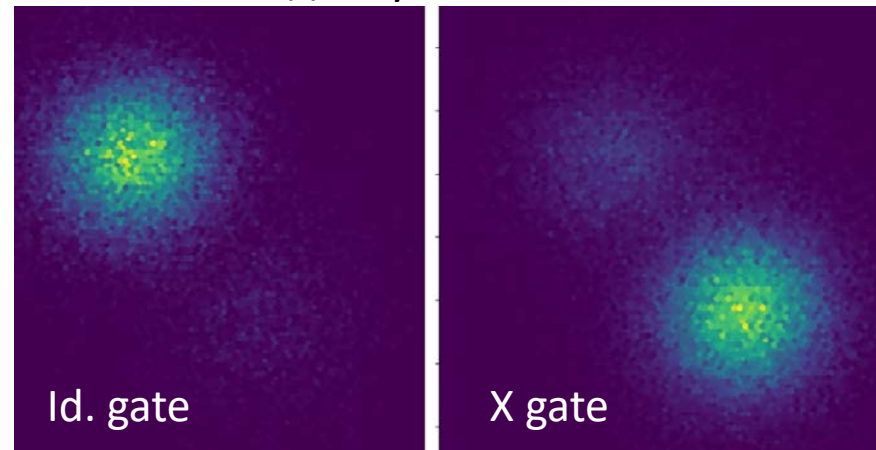
Квантовый симулятор на 5 кубитах



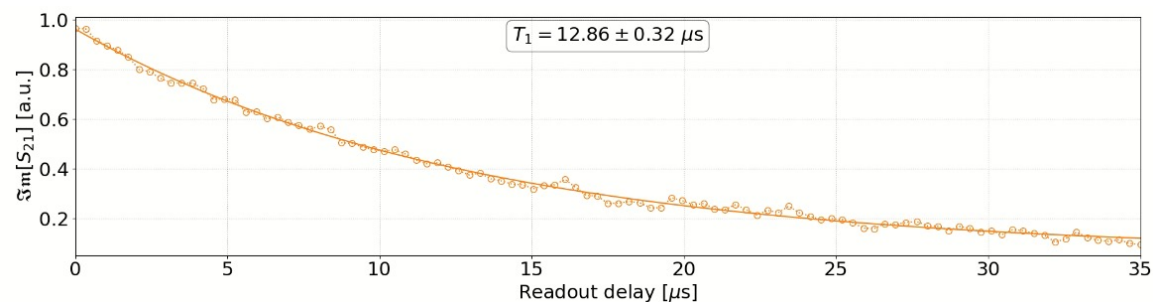
индивидуальный контроль частот



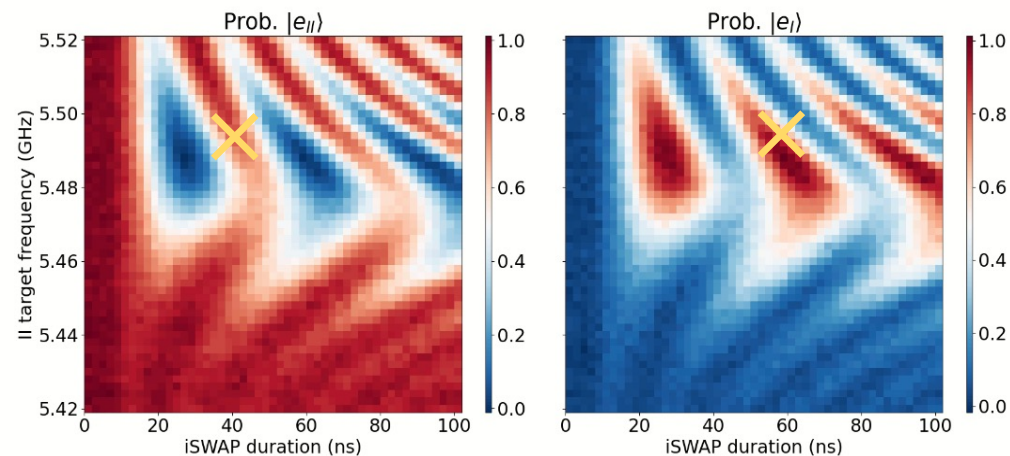
считывание однокубитных состояний



измерение затухания (кубит II A445)



двухкубитная операция iSWAP ($t_g=25$ нс)

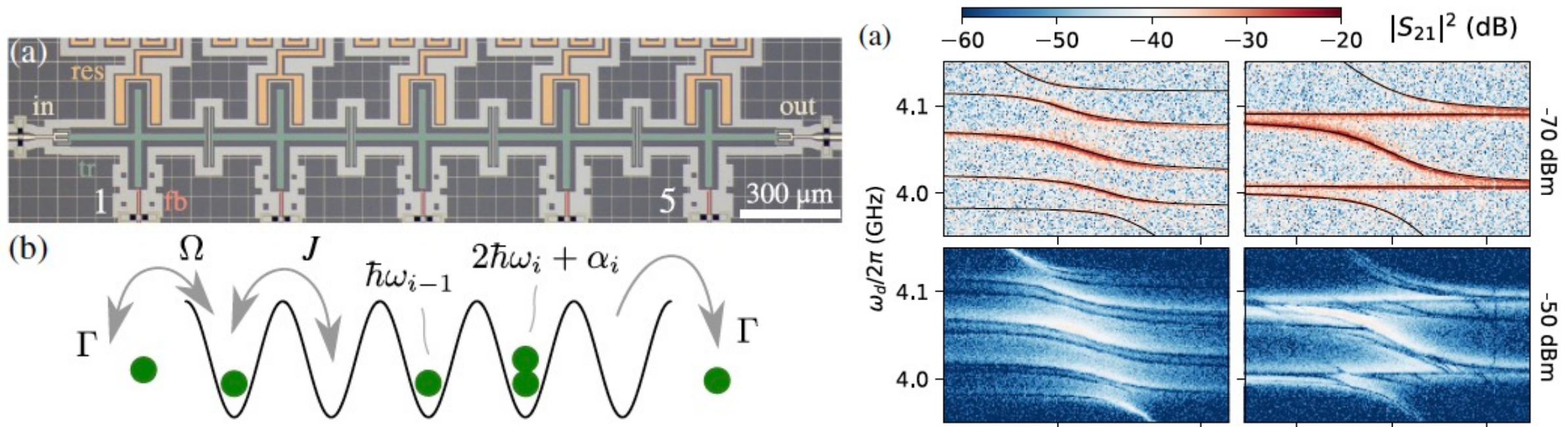


PHYSICAL REVIEW LETTERS **126**, 180503 (2021)

Photon Transport in a Bose-Hubbard Chain of Superconducting Artificial Atoms

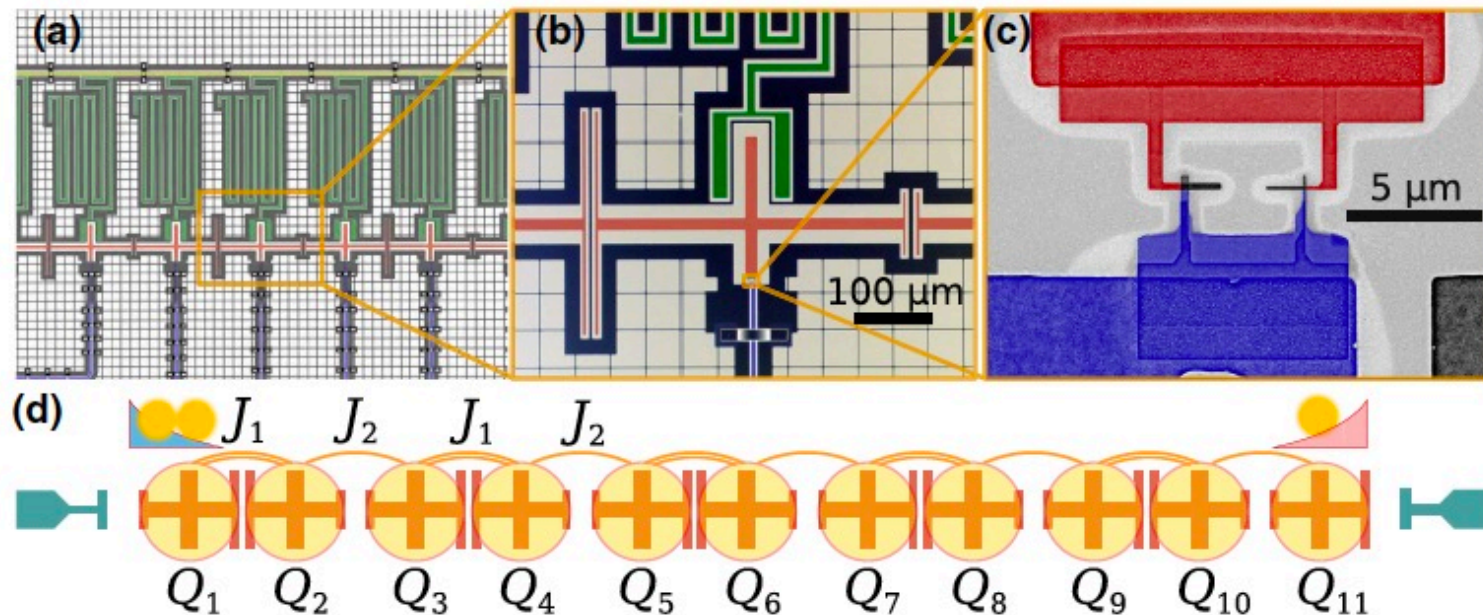
G. P. Fedorov^{1,2,3,*} S. V. Remizov^{4,5} D. S. Shapiro^{4,5} W. V. Pogosov^{4,6} E. Egorova^{1,2,3} I. Tsitsilin^{1,2,3}
M. Andronik^{1,7} A. A. Dobronosova^{7,4} I. A. Rodionov^{7,4} O. V. Astafiev^{8,1,9,10} and A. V. Ustinov^{2,11,3}

5 кубитов



Topological excitations and bound photon pairs in a superconducting quantum metamaterial

Ilya S. Besedin^{1,2}, Maxim A. Gorlach³, Nikolay N. Abramov^{1,2}, Ivan Tsitsilin^{1,2,4,*}, Ilya N. Moskalenko^{1,2}, Alina A. Dobronosova^{5,6}, Dmitry O. Moskalev^{5,6}, Alexey R. Matanin^{5,6}, Nikita S. Smirnov^{5,6}, Ilya A. Rodionov^{5,6}, Alexander N. Poddubny^{3,7,8} and Alexey V. Ustinov^{1,2,9}



11 кубитов

8+ кубитов (цель: декабрь 2022)



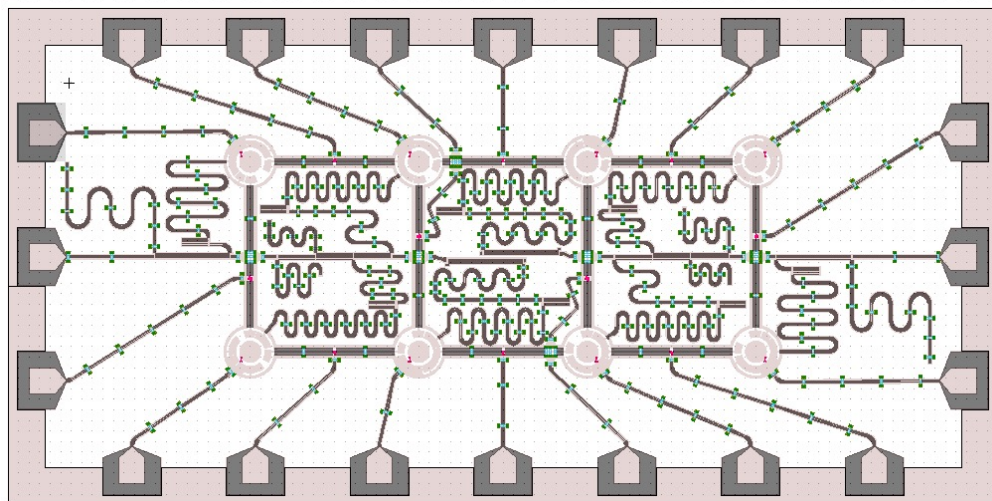
КВАНТОВЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
РОСАТОМ



РКЦ

Российский
Квантовый
Центр

Трансмоны



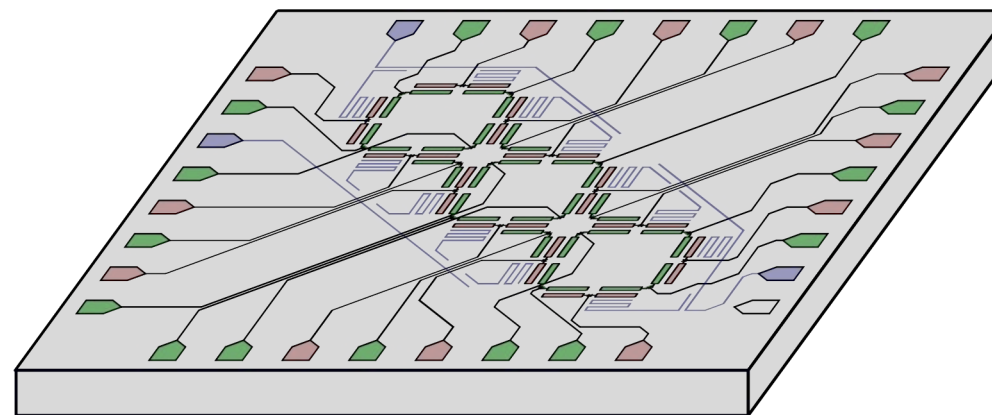
Масштабирование схемы на 4 кубита

Нужны:

- Чип
- **5 AWG x 8 каналов**

Дизайн сейчас под требования МФТИ

Флуксониумы



Масштабирование схемы на 2 кубита

Нужны:

- Дизайн + симуляция (~4 месяца)
- Чип
- **5 AWG x 8 каналов**



Выводы

- Двухкубитная схема на флюксониумах на конкурентном мировом уровне ($F_1 > 99.97\%$; $F_2 > 99.2\%$)
- 4-кубитный процессор на трансмонах принципиально работоспособен, однако времена когерентности пока низкие
- В МФТИ изготовлен 5-кубитный симулятор на основе операций iSWAP, отработан обмен квантовым состоянием между тремя кубитами ($F_2 > 90\%$)

Ключевые участники



Ведущие ученые,
со-руководители



Олег Астафьев



Валерий Рязанов

Молодые
ученые и
специалисты



Илья Беседин



Глеб Федоров



Николай Абрамов



Алексей Дмитриев



Алексей Болгар



Илья Москаленко



Елена Егорова



Илья Симаков



Григорий Мажорин



Алена Казьмина

Современные проблемы сверхпроводниковых кубитов

- компактные и альтернативные кубиты
- высокоточные вентили $> 99,9\%$
- оптимальные импульсы, многокубитные вентили
- увеличение времен когерентности > 100 мкс
- перекрестные наводки в схемах
- теснота в частотном пространстве
- масштабирование, 3D интеграция
- управляющая электроника
- криогенные управляющие схемы