

# Аналоговое моделирование цепочки Изинга при помощи трансмонов

Е. Егорова<sup>1,2</sup>, Г. Федоров<sup>1,2</sup>, А. Доброносова<sup>3</sup>, Н. Орликовский<sup>3</sup>, А. Устинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский квантовый центр <sup>2</sup>Московский физико-технический институт <sup>3</sup>Московский Государственный Технический Университет имени Н. Э. Баумана

## Предисловие

В настоящее время применение сверхпроводящих кубитов, как правило, ограничивается тестированием основных принципов квантовых вычислений, демонстрацией их в качестве концептуальных проектов и разработкой масштабируемых программных и аппаратных интерфейсов. Однако существует и альтернативное решение, включающее использование неотъемлемых квантовых свойств таких устройств для экспериментального изучения фундаментальных физических моделей. В последние годы были продемонстрированы первые успешные попытки[1][2][3] использования небольших массивов сверхпроводящих кубитов для наблюдения квантового аналогового поведения. В данной работе исследуется чип для экспериментального моделирования кристаллической структуры, многочастичной локализации (MBL) и свойств переноса тепла в цепочке трансмонов с XX связью. Первые результаты затронут спектроскопические свойства системы.

## Контекст исследования

Гамильтониан пяти трансмонов, взаимодействующих только с ближайшими соседями, можно записать в виде суммы гамильтониана трансмонов без и с взаимодействием:

$$\hat{H}_{full} = \hat{H}_{single} + \hat{H}_{interaction},$$

где  $\hat{H}_{single} = \sum_{i=1}^5 \hat{1}_1 \otimes \hat{1}_2 \otimes \dots \otimes \hat{1}_{i_0} \otimes \dots \otimes \hat{1}_5$ ,

$$\hat{H}_{int} = \sum_{i=1}^4 \frac{e^2 M_{i,j=i+1}^{-1}}{2} \hat{1}_1 \otimes \hat{1}_2 \otimes \dots \otimes \hat{n}_i \otimes \hat{n}_j \otimes \dots \otimes \hat{1}_5.$$

Здесь  $\hat{H}_{i_0}$  - гамильтониан одного трансмона, а  $M_{i,j=i+1}^{-1}$  - элемент обратной матрицы емкости. Гамильтониан Изинга можно записать как

$$H = -\frac{1}{2} \sum_i h_i \sigma_{z,i} + \hbar \sum_i J_{x,t} \sigma_{x,i} \sigma_{x,i+1},$$

где  $J_{y,i}, J_{z,i} = 0$ . Так как два вышеописанных гамильтониана имеют схожую структуру, то становится возможным осуществлять аналоговое моделирование спиновой цепочки.

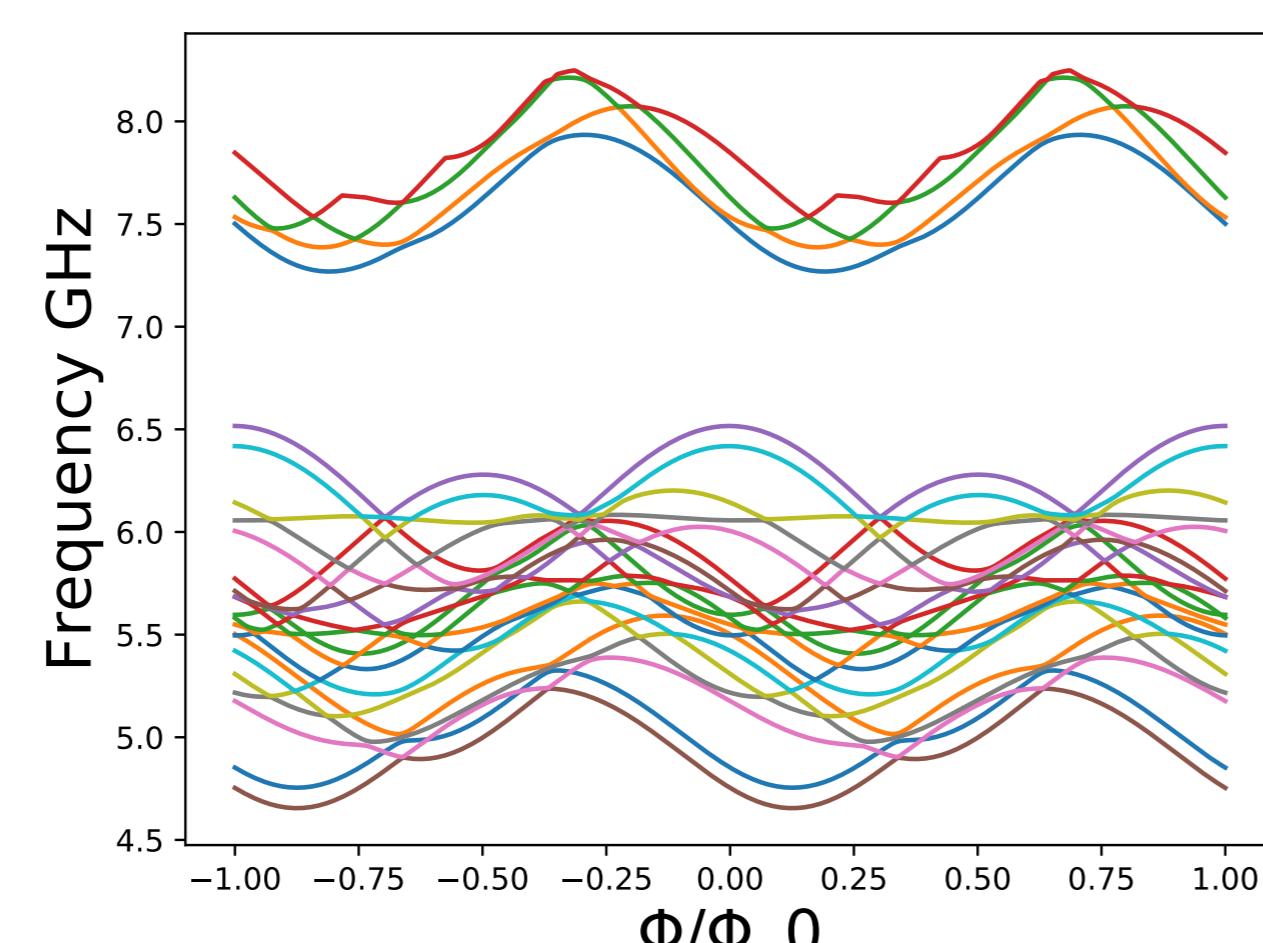


Рис. 1: Спектр пятикубитной цепочки в зависимости от нормированного потока в СКВИде (ключевом элементе трансмона). Первые 20 уровней.

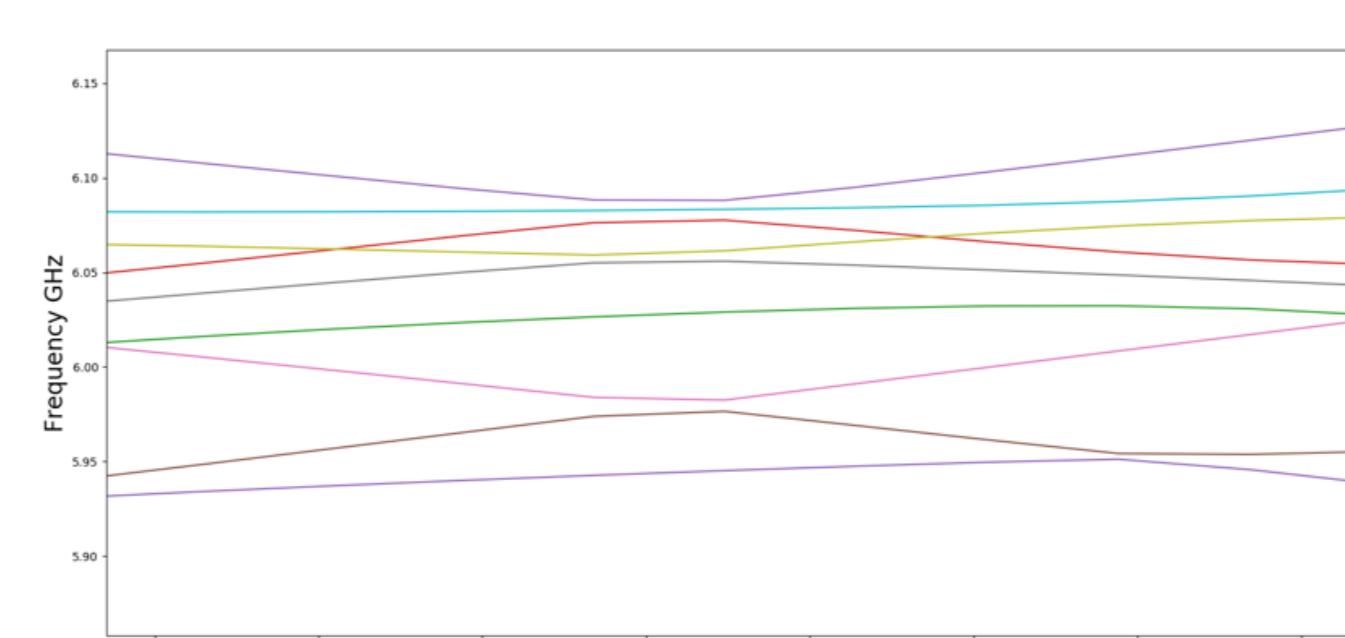


Рис. 2: Увеличенный участок спектра пятикубитной цепочки. Снятие вырождения уровней энергии (т.н. антикресинг) вследствие наличия взаимодействия кубитов.

## Дизайн образца

Образец был изготовлен на кремниевой подложке с помощью электронной литографии и метода термического напыления в чистой зоне МГТУ им. Баумана.

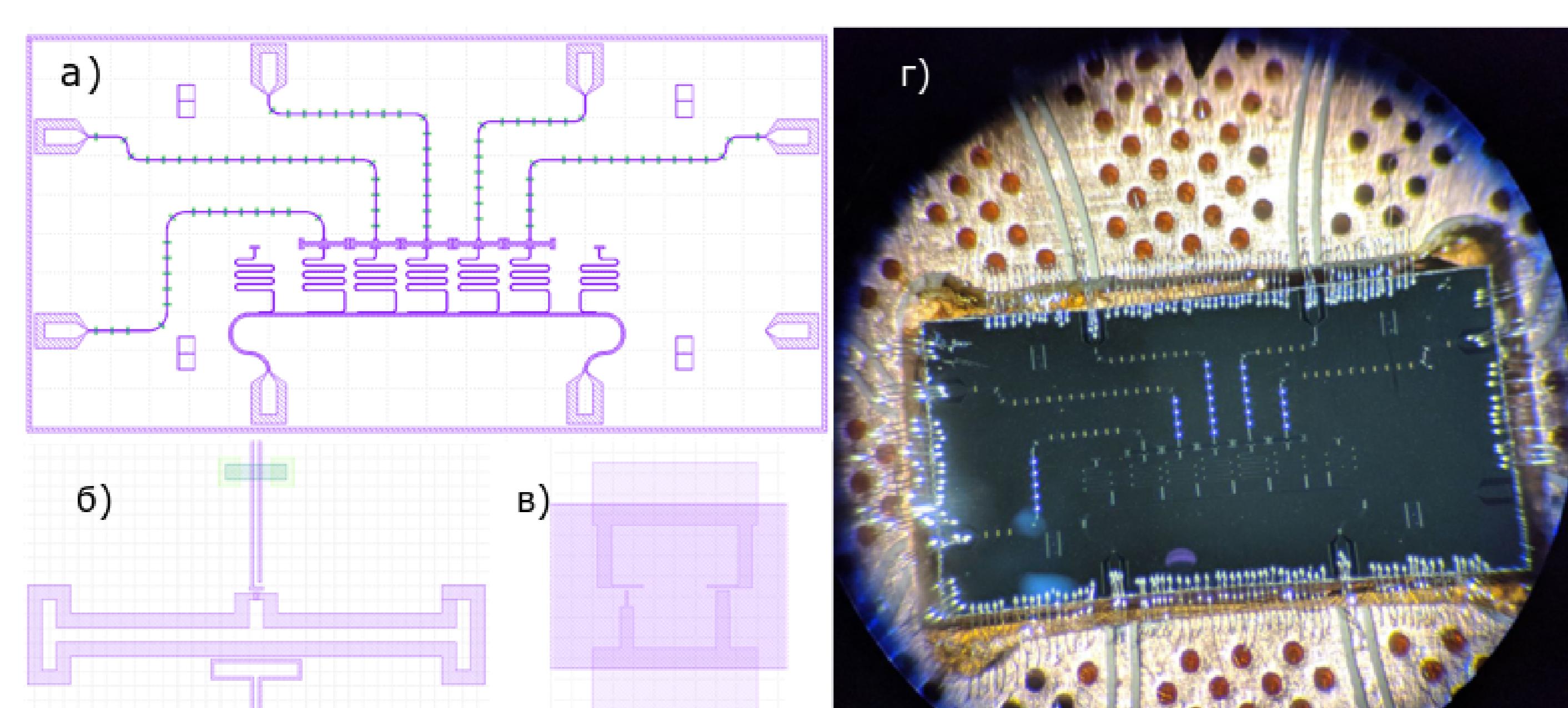


Рис. 3: (a) Дизайн образца: 5 трансмонов, выстроенных в цепочку с поперечной связью и возможностью считывания состояния каждого кубита. (б) (в) Увеличенные области со СКВИДом и потоковой линией смещения. (г) Образец, соединенный с держателем с помощью ультразвуковой сварки.

## Расчет емкостей в ANSYS Maxwell

Матрица емкости пяти кубитов может быть записана следующим образом:

$$M = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^5 C_{q1k} & -C_{q12} & C_{q13} & C_{q14} & C_{q15} \\ -C_{q12} & \sum_{k=1}^5 C_{q2k} & -C_{q23} & -C_{q24} & C_{q25} \\ -C_{q13} & -C_{q23} & \sum_{k=1}^5 C_{q3k} & -C_{q34} & C_{q35} \\ -C_{q14} & -C_{q24} & -C_{q34} & \sum_{k=1}^5 C_{q4k} & -C_{q45} \\ -C_{q15} & -C_{q25} & -C_{q35} & -C_{q45} & \sum_{k=1}^5 C_{q5k} \end{pmatrix}.$$

Для контроля взаимодействия преимущественно с ближайшими соседями был проведен расчет емкостей имеющегося дизайна.

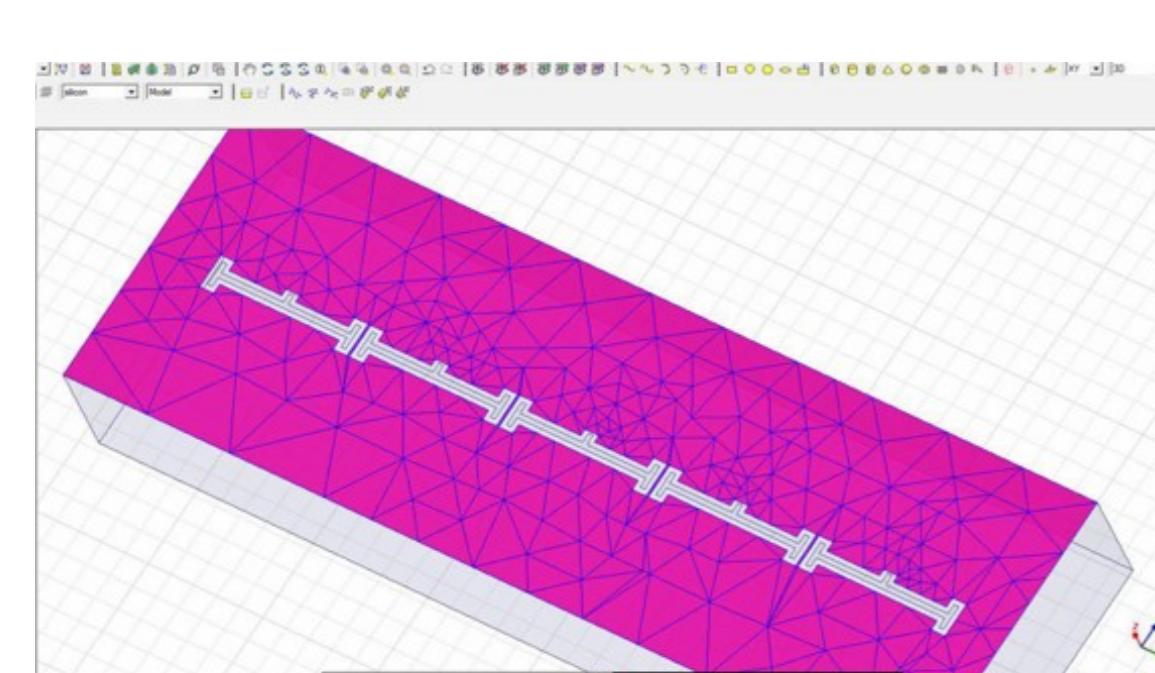


Рис. 4: Расчет емкостей методом конечных элементов. Справа приведена таблица с полученной матрицей емкости в фФ.

Nº/Nº	C <sub>q1</sub>	C <sub>q2</sub>	C <sub>q3</sub>	C <sub>q4</sub>	C <sub>q5</sub>	C <sub>ground</sub>
C <sub>q1</sub>	204.32	-1.6719	-0.0165	-0.0024	-0.0004	-202.63
C <sub>q2</sub>	-1.6719	184.42	-1.5558	-0.016	-0.0024	-181.18
C <sub>q3</sub>	-0.0165	-1.5558	208.25	-1.4411	-0.0166	-205.22
C <sub>q4</sub>	-0.0024	-0.016	-1.4411	196.76	-1.1688	-194.13
C <sub>q5</sub>	-0.0004	-0.0024	-0.0166	-1.1688	209.54	-208.36
C <sub>ground</sub>	-202.63	-181.18	-205.22	-194.13	-208.36	991.51

## Схема установки

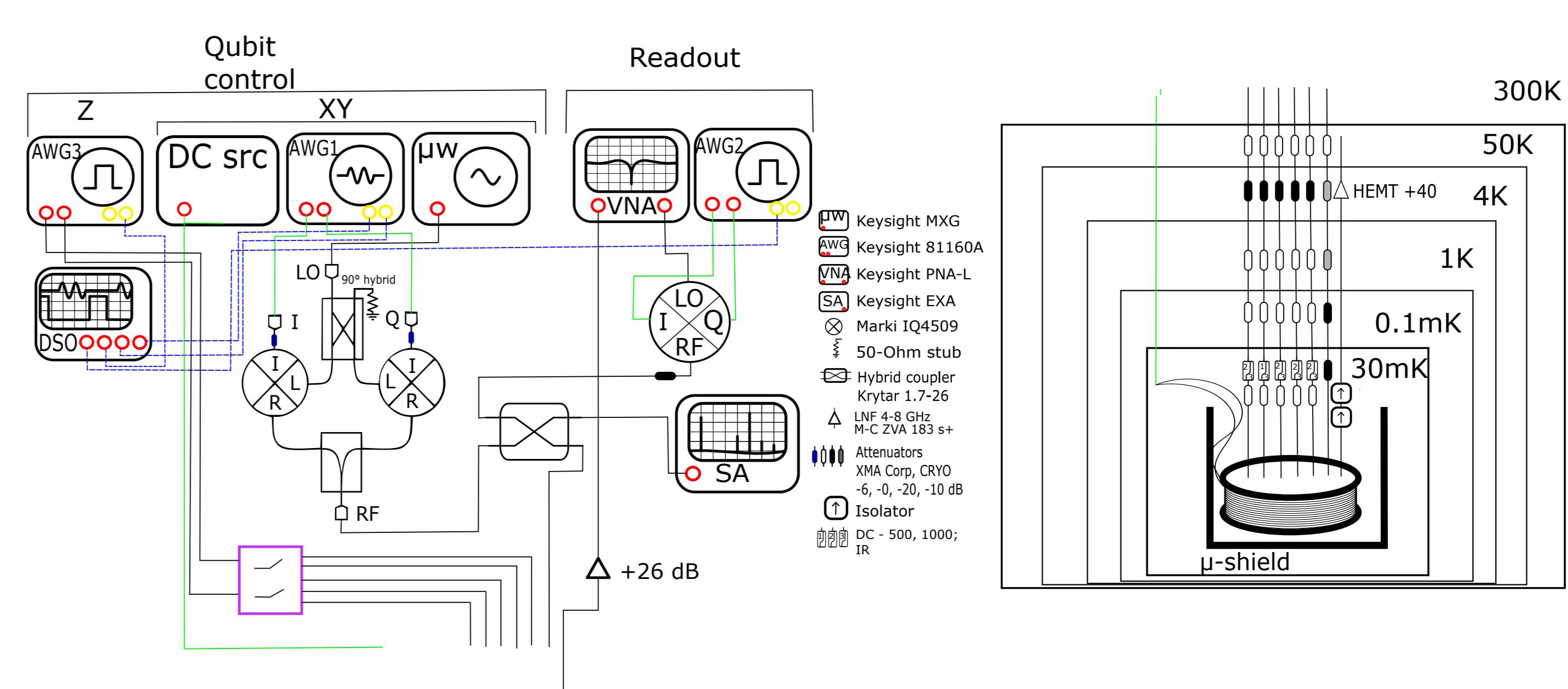


Рис. 5: Слева изображена собранная схема для спектроскопических и импульсных измерений, в правой- аттенюация и фильтрация линий на ступенях криостата и непосредственно образец в держателе с катушкой.

## Эксперимент

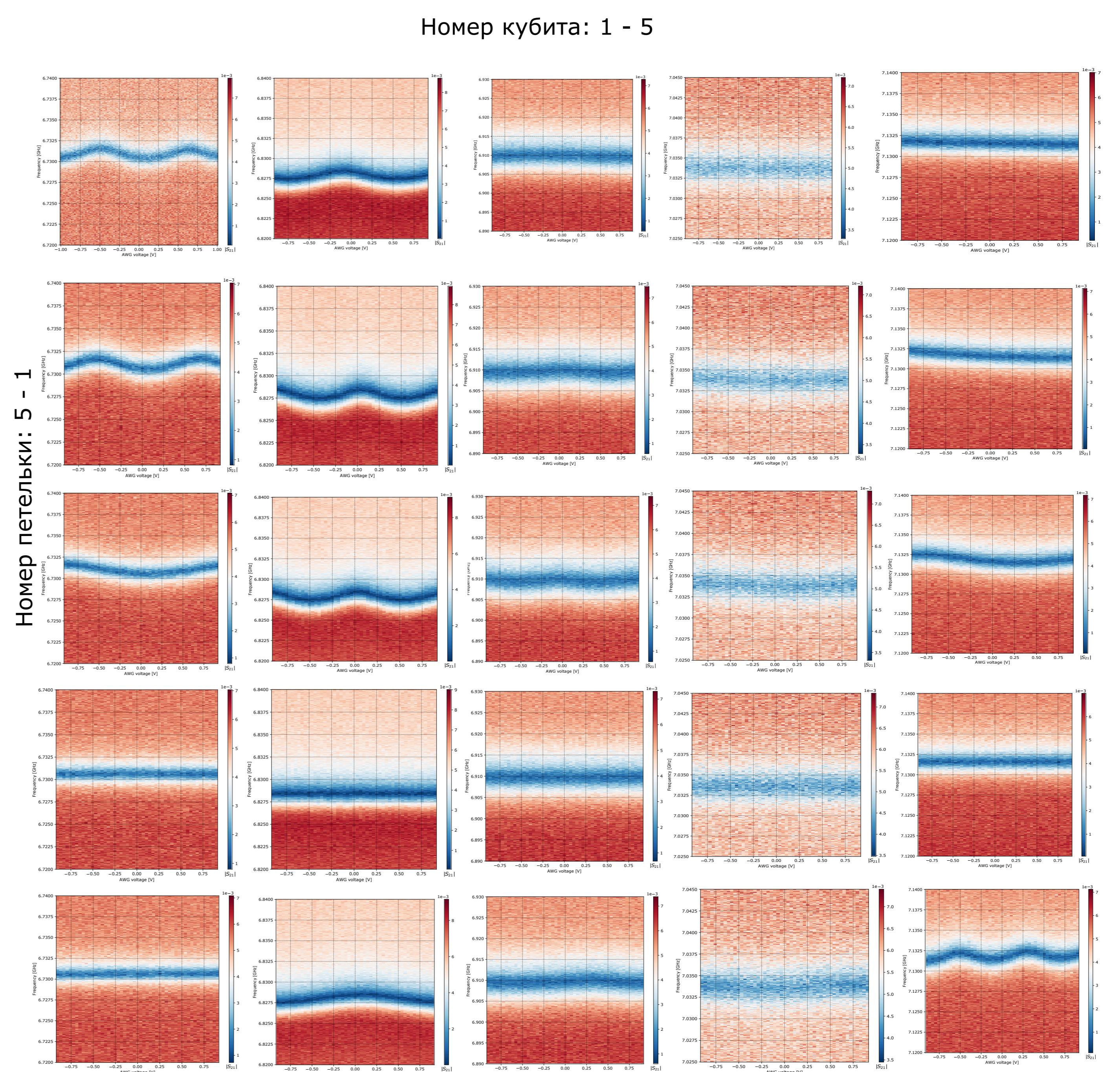


Рис. 6: Зависимость картин однотоновой спектроскопии резонаторов от используемой потоковой линии смещения. Нумерация кубитов и резонаторов совпадает. По оси х на каждой картине отложено напряжение, подаваемое на потоковую линию смещения, по оси у - частота сигнала на линию передачи. Цветом обозначен модуль пропускания сигнала через резонатор на соответствующей частоте.

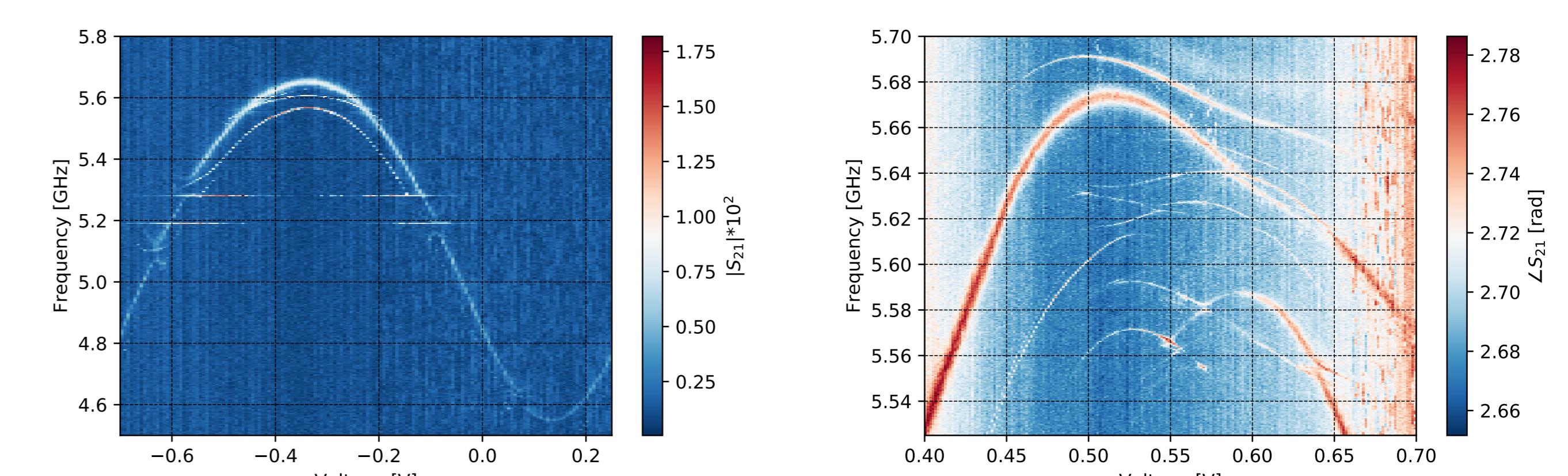


Рис. 7: Двухтоновая спектроскопия второго кубита с анти-кресингами.

## Выводы

В данной работе мы спроектировали, изготовили и измерили цепочку из пяти трансмонов. Посредством моделирования показано, что данный дизайн пригоден для симуляции модели Изинга. В ходе измерений были получены картины, подтверждающие наличие взаимодействия кубитов друг с другом. Однако, из-за перекрестного взаимодействия потоковых линий смещения и кубитов необходимо в дальнейшем выполнить калибровку и повторить измерения для точного определения констант взаимодействия кубитов друг с другом.

## Литература

- Perfect quantum state transfer in a superconducting qubit chain with parametrically tunable couplings / Xuegang Li, Y Ma, J Han et al. // Physical Review Applied. – 2018. – Vol. 10, no. 5. – P. 054009.
- Implementation of a quantum metamaterial using superconducting qubits / Pascal Macha, Gregor Oelsner, Jan-Michael Reiner et al. // Nature communications. – 2014. – Vol. 5. – P. 5146.
- Spectroscopic signatures of localization with interacting photons in superconducting qubits / P Roushan, C Neill, J Tangpanitanon et al. // Science. – 2017. – Vol. 358, no. 6367. – P. 1175–1179.