

Предисловие

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

Контекст исследования

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

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

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

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

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

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

где  $J_{y,i}, J_{z,i} = 0$ . Так как два вышеописанных га-мильтониана имеют схожую структуру, то стано-вится возможным осуществлять аналоговое моде-лирование спиновой цепочки.

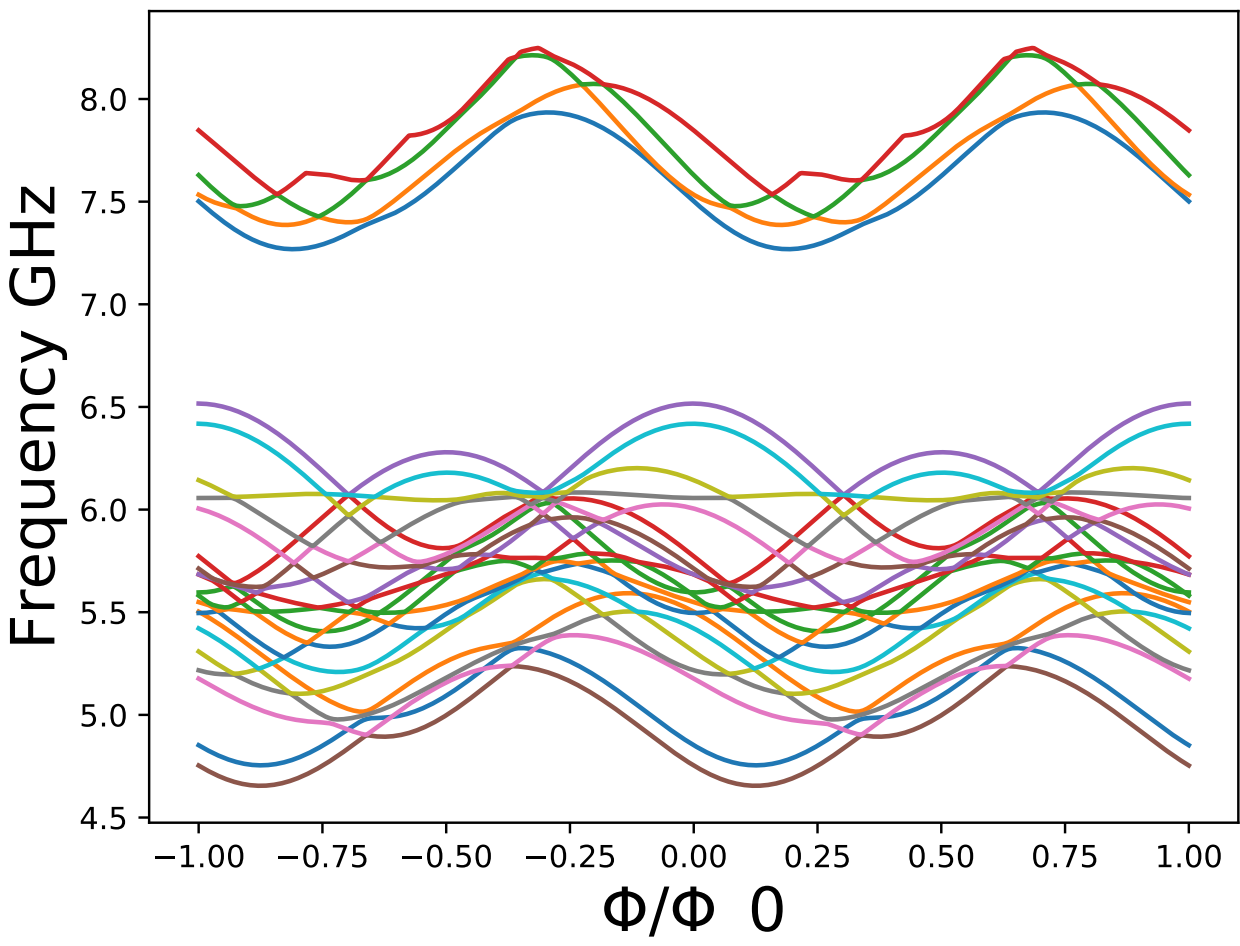


Рис. 1: Спектр пятикубитной цепочки. Первые 20 уровней.

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 емко-стей имеющегося дизайна.

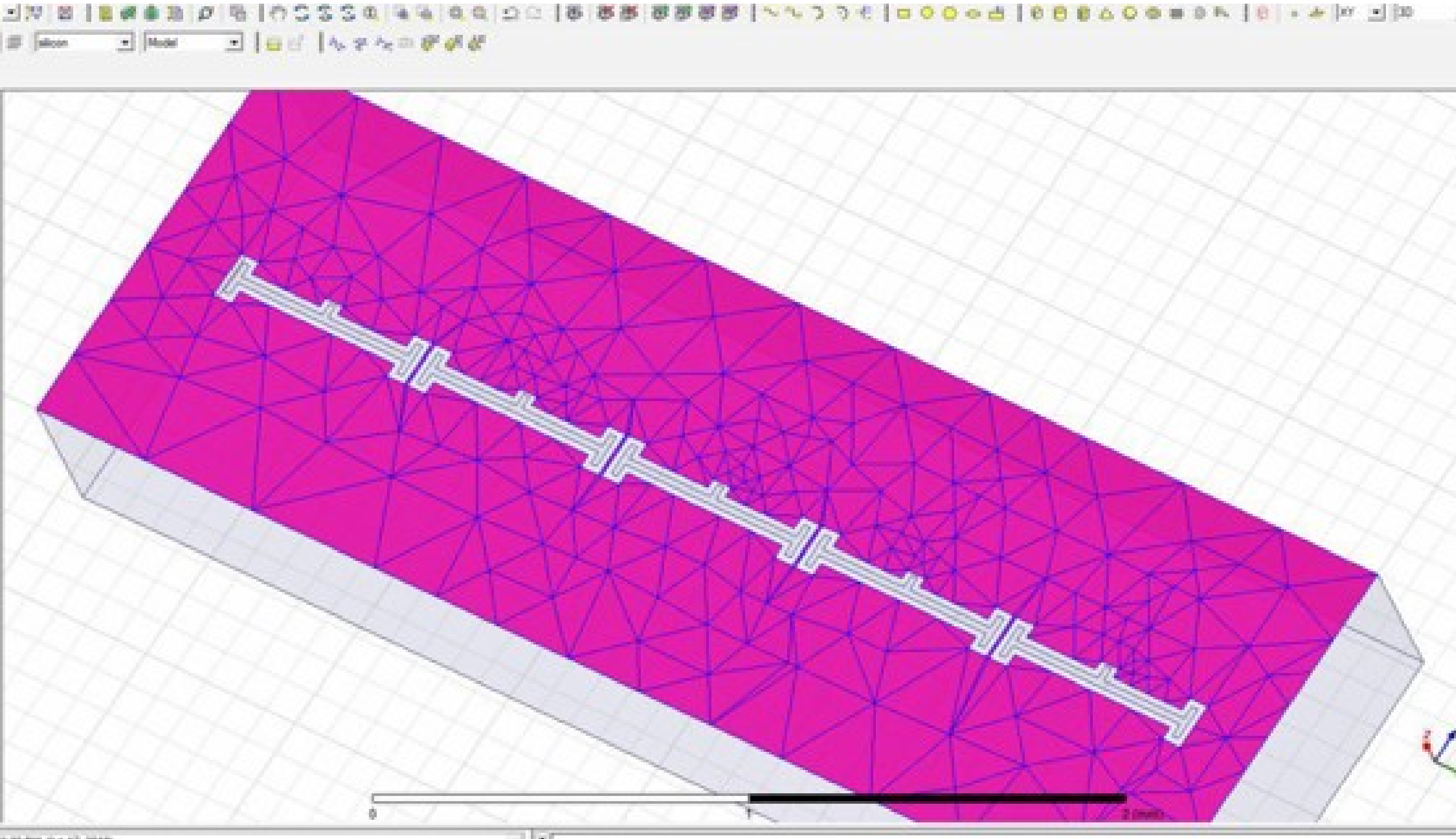


Рис. 3: Расчет емкостей методом конечных элементов. Таблице с матрицей емкости в фФ.

N <sup>o</sup> /N <sup>o</sup>	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	-0.01648	-0.0023559	-0.00041832	-202.63
C <sub>q2</sub>	-1.6719	184.42	-1.5558	-0.015993	-0.0023771	-181.18
C <sub>q3</sub>	-0.01648	-1.5558	208.25	-1.4411	-0.016563	-205.22
C <sub>q4</sub>	-0.0023559	-0.015993	-1.4411	196.76	-1.1688	-194.13
C <sub>q5</sub>	-0.00041832	-0.0023771	-0.016563	-1.1688	209.54	-208.36
C <sub>ground</sub>	-202.63	-181.18	-205.22	-194.13	-208.36	991.51

Дизайн образца

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

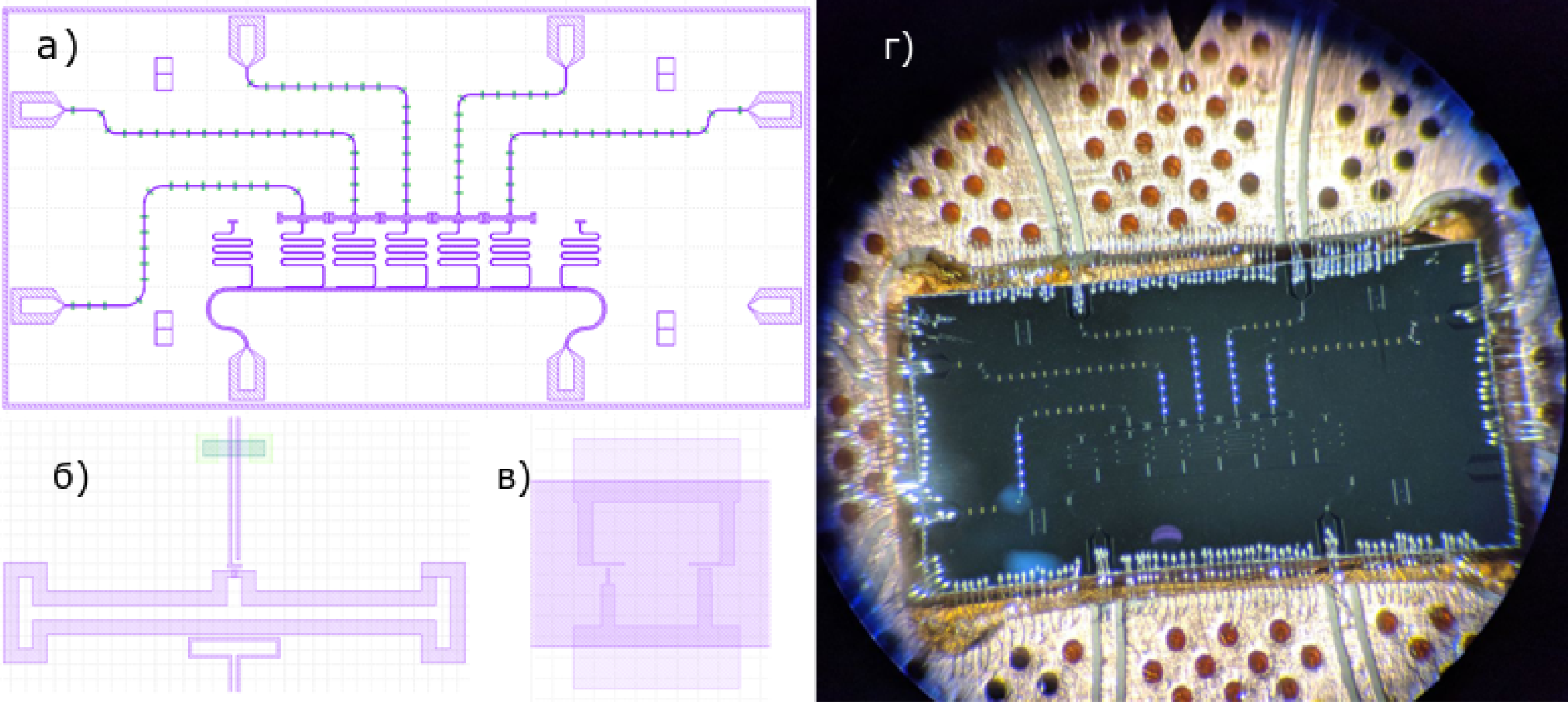


Рис. 2: (а) Дизайн образца: 5 трансмонов, выстроенных в цепочку с поперечной связью и возможностью считывания состояния каждого кубита. (б) (в) Увеличенные области со СКВИДом и потоковой линией смещения. (г) Образец, со-единенный с держателем с помощью ультразвуковой сварки.

Схема установки

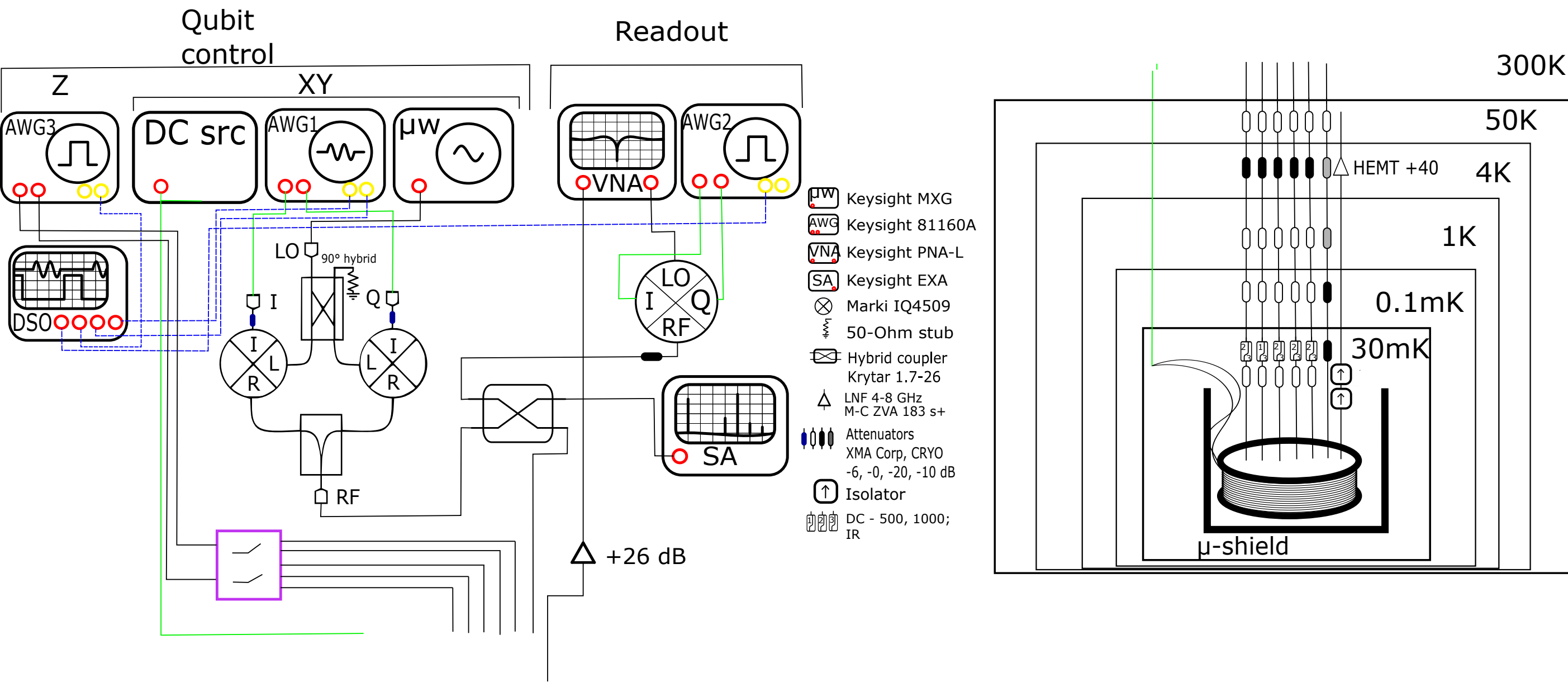


Рис. 4: Слева изображена собранная схема для спектроскопических и импульсных измерений, в правой- аттенюация и фильтрация линий на ступенях криостата и непосредственно образец в держателе с катушкой.



Номер кубита: 1 - 5

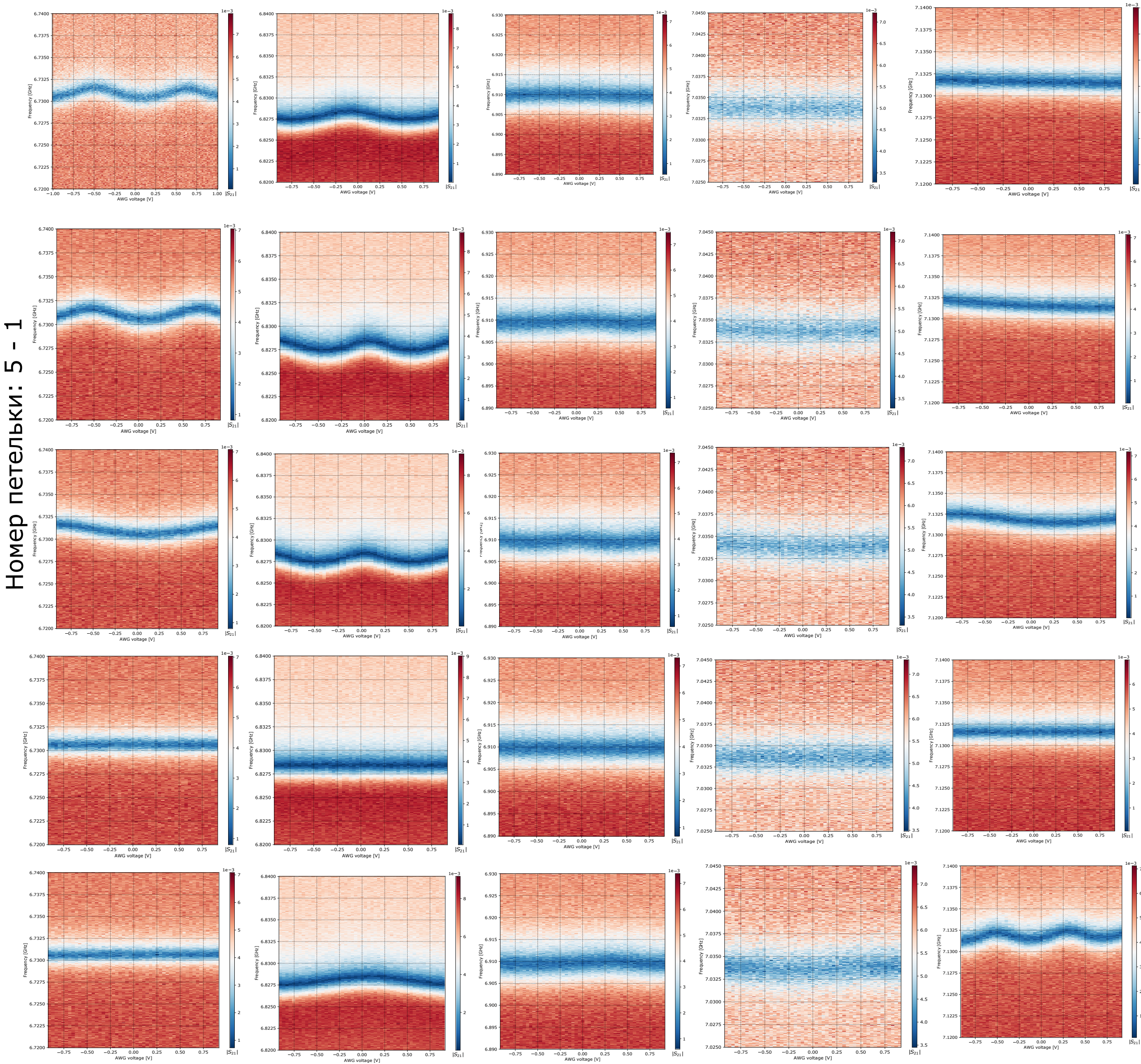


Рис. 5: Зависимость картин однотоновой спектроскопии кубитов от используемой токовой линии смещения.

???

## Литература

### Список литературы

- [1] 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.
- [2] Implementation of a quantum metamaterial using superconducting qubits / Pascal Macha, Gregor Oelsner, Jan-Michael Reiner et al. // Nature communications. — 2014. — Vol. 5. — P. 5146.
- [3] 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.