



МГТУ, МТ-11

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Факультет «Машиностроительные технологии»
Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»



НОЦ «ФМНС»

Малеванная Елизавета Ильинична

Исследование и разработка систем экранирования в технологическом оборудовании для измерения параметров сверхпроводниковых структур

Сверхпроводниковые структуры в качестве вычислителей

Области применения вычислителей на основе сверхпроводниковых структур

Квантовая криптография и кибербезопасность



Симуляция работы квантовых систем и биологических процессов



Поиск новых лекарств и химических соединений



Обработка больших объемов данных



Искусственный интеллект



Логистика и транспорт



IBM, Rigetti, D-Wave – компании, предоставляющие доступ к своим сверхпроводниковым процессорам через облако

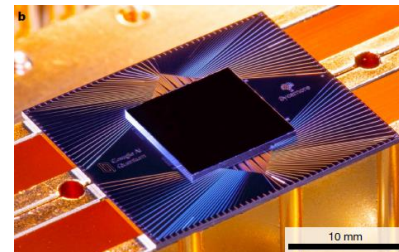
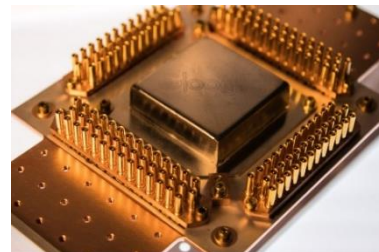
D-Wave 2000Q



IBM Q System One



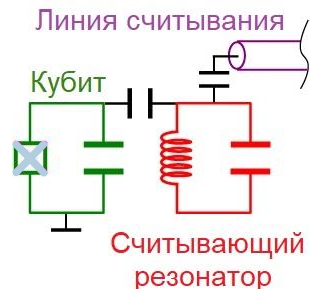
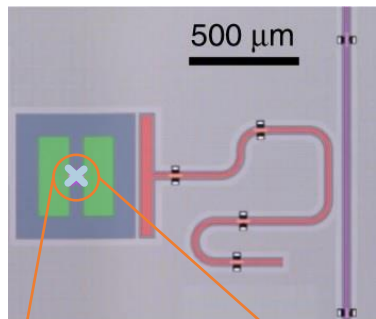
Процессор Sycamore от Google – демонстрация квантового превосходства на сверхпроводниковой платформе



F. Arute [et al.], Nature, 574, 505-510, 2019

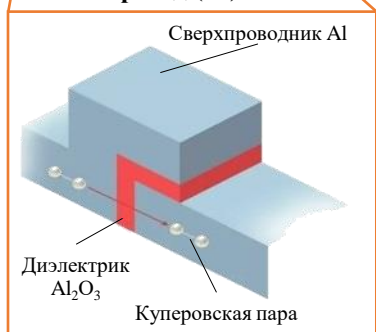
Сверхпроводниковые вычислители и их инфраструктура

Сверхпроводниковая структура из алюминия

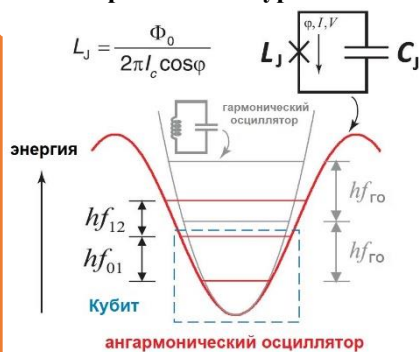


S. Kono [et al.], Nat Commun, 11, 3683, 2020

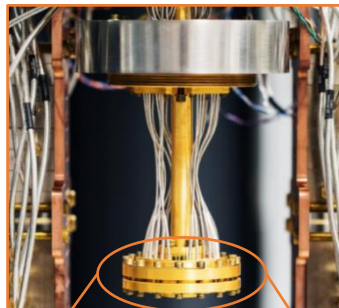
Джозефсоновский переход (JJ)



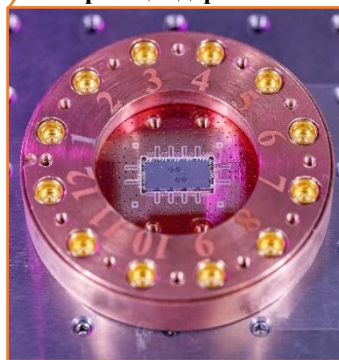
Энергетические уровни



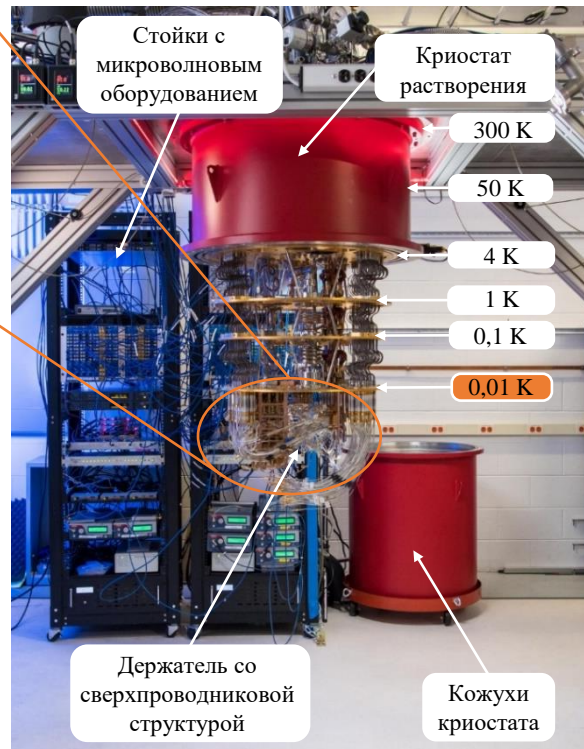
Держатель в криостате



Образец в держателе



Криостат растворения и оборудование



<https://ria.ru/20191128/1561661456.html>

W.D. Oliver [et al.] MRS Bulletin 38, 816–825, 2013

Источники декогеренции сверхпроводниковых структур

Декогеренция – процесс потери квантовой системой информации о своем состоянии

Декогеренция = Релаксация + Дефазировка

Источники декогеренции

Внутренние
источники

Магнитные
вихри

Двухуровневые
системы

Туннелирование
квазичастиц

Диэлектрические
потери в подложке

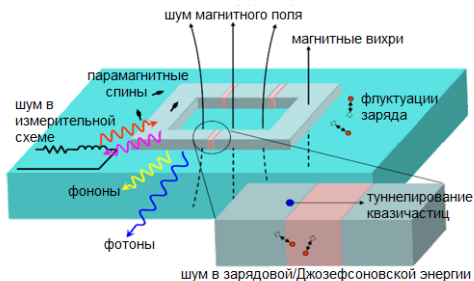
Внешние
источники

Зарядовые
шумы

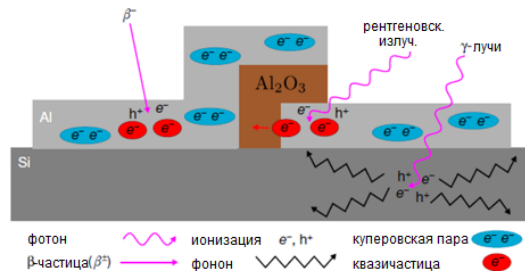
Потоковые
шумы

Эффект
Парселла

Спонтанное
излучение



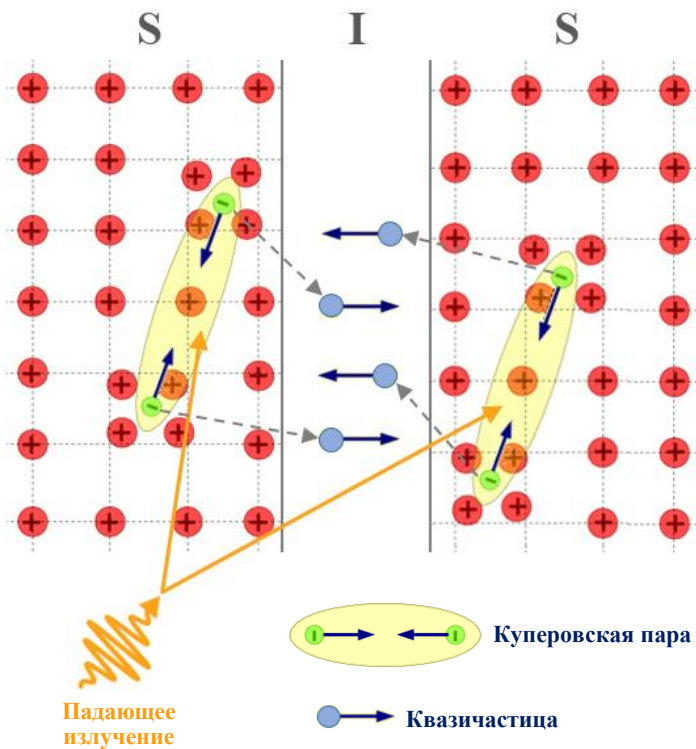
G. Ithier [et al.], PHYSICAL REVIEW B, 72., 134519, 2005



A. P. Vepsäläinen [et al.], Nature, 584, 551-568, 2020

Квазичастицы в сверхпроводнике

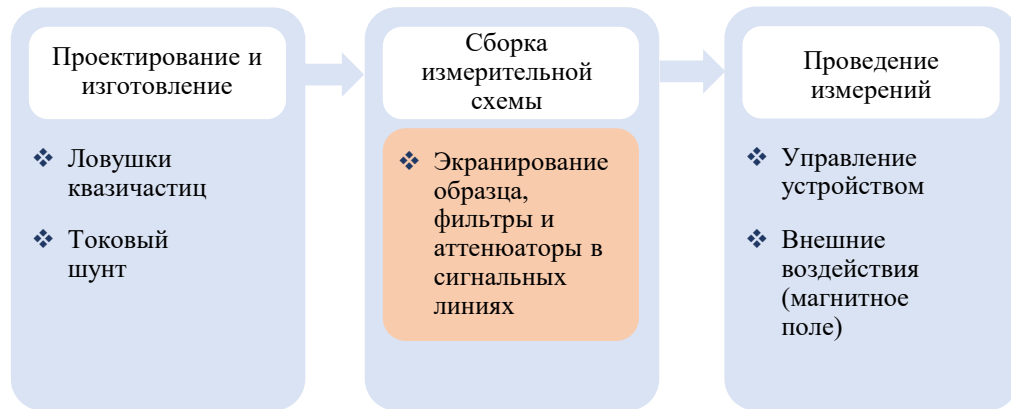
Туннелирование квазичастиц из-за излучения



Причины возникновения квазичастиц

- ❖ Инфракрасное (ИК) излучение (5-60 пВт)
- ❖ γ -излучение (0,02 пВт)
- ❖ β -частицы (фоновая радиация) (~0,02 пВт)
- ❖ Электромагнитное излучение оборудования
- ❖ Управляющие сигналы

Способы уменьшения плотности квазичастиц в сверхпроводниковых структурах



Научные группы в области сверхпроводниковых технологий

Северная Америка



University of Waterloo D-Wave Systems Inc.

MIT IBM NIST Caltech

UC Berkeley Yale University

UC Santa Barbara Rigetti Computing



Google AI Quantum Princeton University

Washington University University of Maryland

University of Wisconsin-Madison

Европа и Азия



Karlsruhe Institute of Technology



Chalmers University



Université Pierre et Marie Curie



ETH Zurich



Royal Holloway University of London



Япония



Delft University of Technology



Китай



Россия

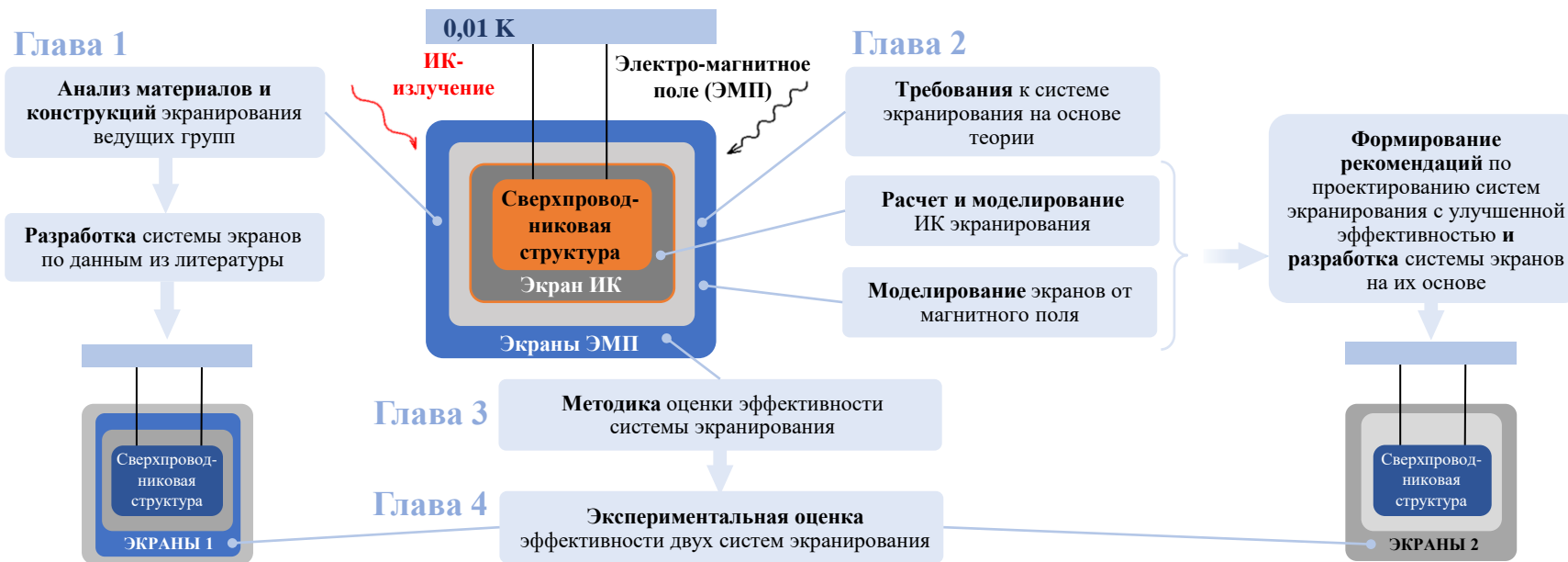
Существующие проблемы

- ❖ Отсутствие **систем экранирования с измеренной эффективностью**
- ❖ Отсутствие **рекомендаций по экранированию** сверхпроводниковых структур
- ❖ Отсутствие методики для **оценки эффективности систем экранирования**

Цель

Научно обоснованный выбор материалов и конфигурации систем экранирования сверхпроводниковых структур и разработка методики оценки эффективности таких систем.

Задачи



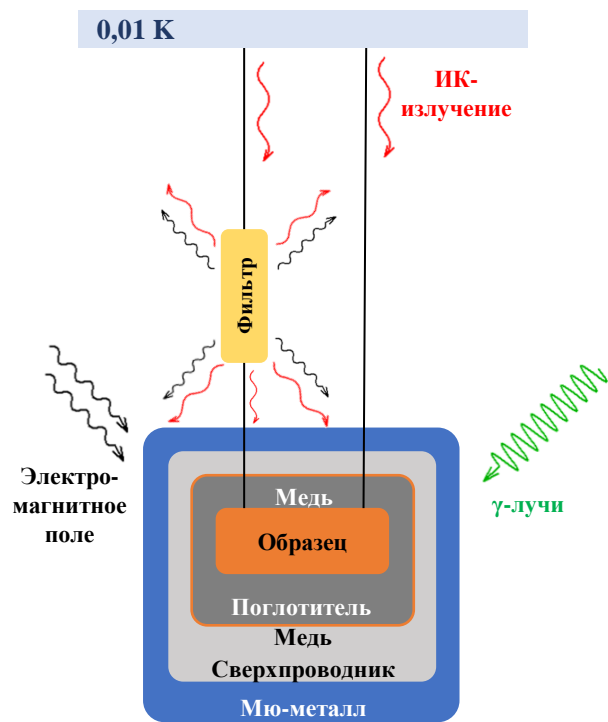
1. На основе теории теплопередачи излучением и законов магнитостатики определены зависимости между конструктивными элементами систем экранирования и эффективностью подавления внешнего ИК излучения и магнитного поля.
2. С помощью установленных зависимостей определены и обоснованы требования к конструкции и конфигурации систем экранирования, что позволяет проектировать систему экранов в технологическом оборудовании для измерения параметров сверхпроводниковых структур.
3. Научно обосновано применение способа количественной оценки эффективности систем экранирования, где в качестве критериев используется три параметра, измеряемых в сверхпроводниковой структуре, чувствительной к зарядовым шумам: время жизни зарядовой четности, нормализованная плотность квазичастиц и эффективная температура сверхпроводниковой структуры.

Практическая значимость

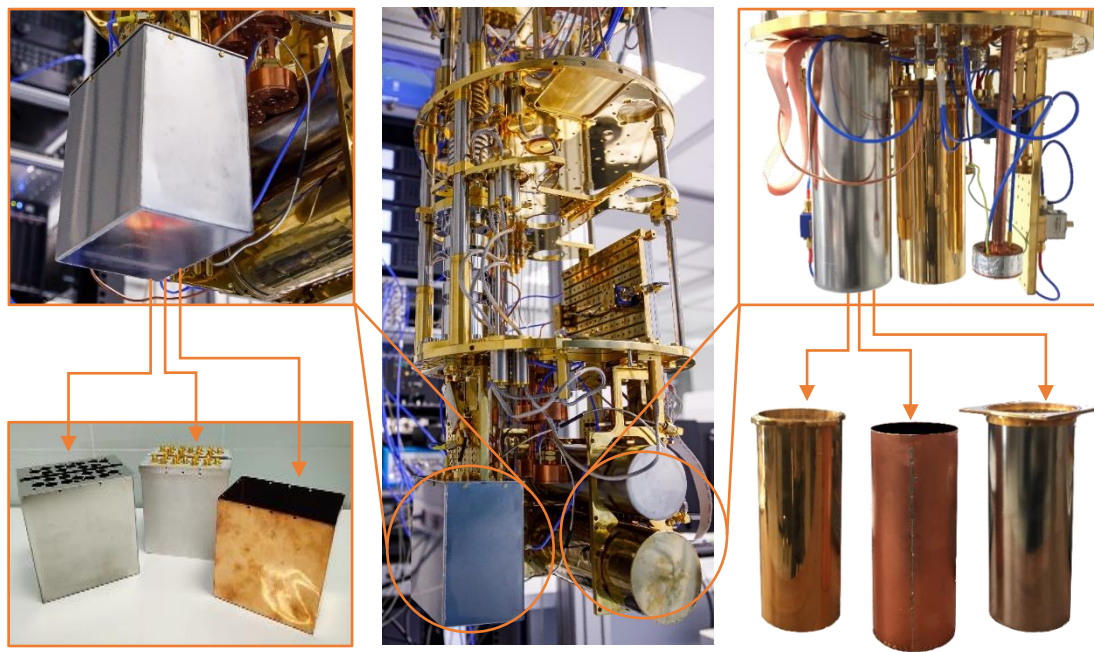
1. Сформулированы рекомендации по проектированию систем экранирования в технологическом оборудовании для измерения параметров сверхпроводниковых структур.
2. Спроектирован и изготовлен опытный образец системы экранирования, состоящий из держателя с поглощающим покрытием, внутреннего сверхпроводящего экрана с герметичной крышкой и отверстиями под ввод СВЧ кабелей и внешнего мю-металлического экрана, обеспечивающий время жизни зарядовой четности и нормализованную плотность квазичастиц лучше на 2,5 порядка и эффективную температуру сверхпроводниковой структуры ниже на ~15% по сравнению с неэкранированным образцом.
3. Разработана методика оценки эффективности систем экранирования, основанная на измерениях переключений зарядовой четности, позволяющая определить комплексное влияние системы экранирования на сверхпроводниковую структуру.

Защита сверхпроводниковых структур от внешних воздействий

Схема многоступенчатого экранирования

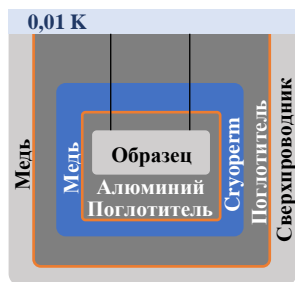


Система экранов в криостате

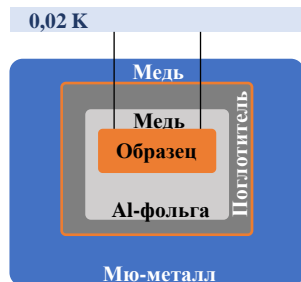


Отсутствие критериев оценки эффективности систем экранирования

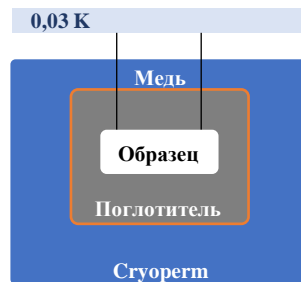
Системы экранирования ведущих научных групп



J. Burnett [et al.] npj Quantum Information, 5, 9, 2019



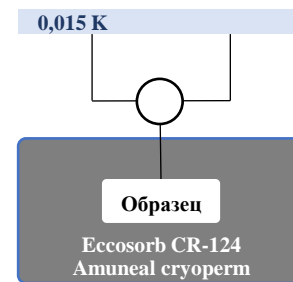
Schwartz Mollie Elisheva, PhD Dissertation, 2016



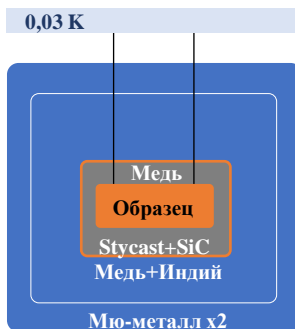
A. Eddins [et al.] Phys Rev Lett, 120, 4, 040505, 2018



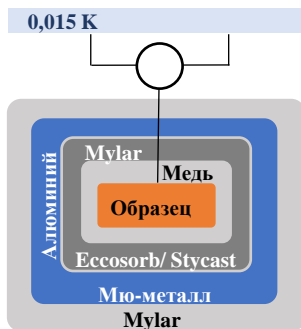
Schmitt Vivien, PhD Dissertation, 2015



A. D. Córcoles [et al.], Nat Commun, 6, 6979, 1-10, 2015



Gyenis A. [et al.] PRX Quantum, 2, 010339, 2021



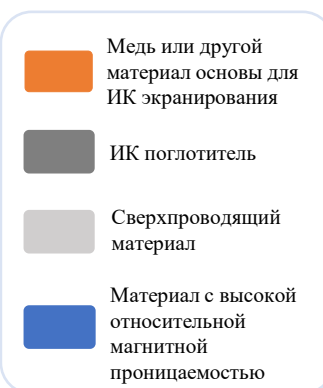
A. P. M. Place [et al.] Nat Commun, 12, 1779, 1-6, 2021



F. Yan [et al.] Nat Commun, 7, 12964, 2016



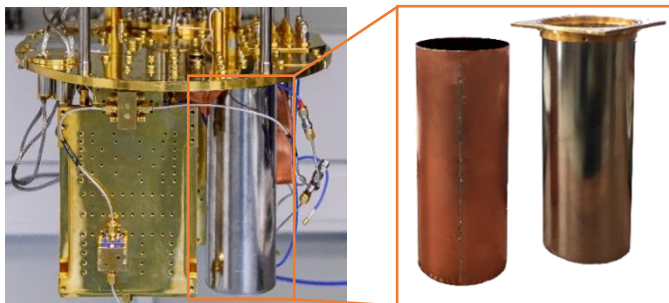
Burnett Jonathan, PhD Dissertation, 2013



Отсутствие единой последовательности экранов, их количества и перечня используемых материалов

Анализ материалов для защиты от ИК излучения

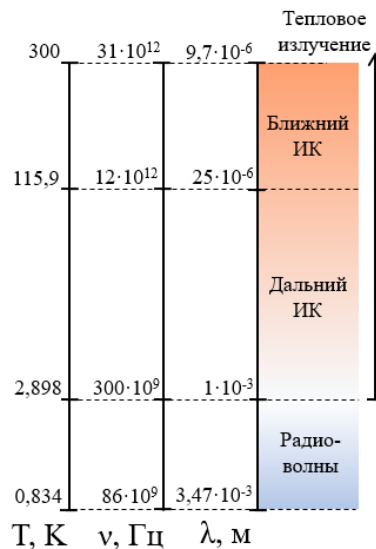
Система ИК экранирования



Требования к свойствам поверхностей

- ❖ Излучающие поверхности – с минимальным коэффициентом поглощения
- ❖ Внешняя поверхность экранов – с минимальным коэффициентом поглощения
- ❖ Поглощающее покрытие – неметаллическое, но с хорошей теплопроводностью (от 1 до 3 Вт/(м·К))
- ❖ Поглощающее покрытие – оптически шероховатое для диапазона длин волн от $1 \cdot 10^{-3}$ м и ниже
- ❖ Температура поглощающего покрытия должна быть ниже, чем у сверхпроводниковой структуры

Диапазон излучения

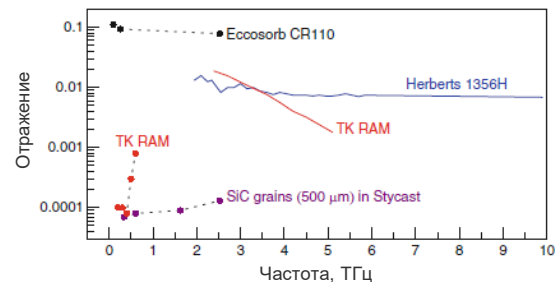


Оптическая шероховатость поверхности



Смолы и покрытия

- ❖ **Stycast 2850 FT**
- ❖ **Eccosorb CR-series (110, 124)**
- ❖ Marconi LAO 5
- ❖ Herberts 1356H
- ❖ Thomas Keating Ltd. (TK RAM)



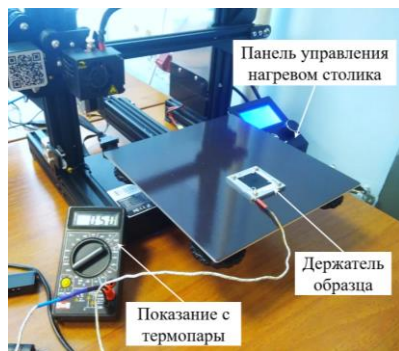
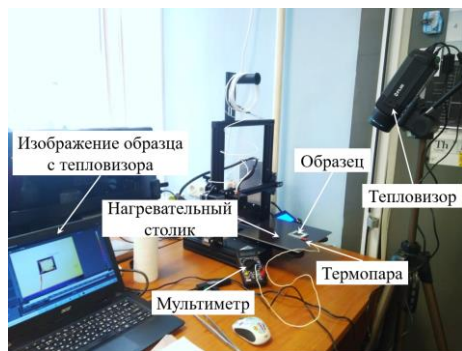
E. Bründermann [et al.] Terahertz Techniques, 2012

Дополнительные частицы на поверхности

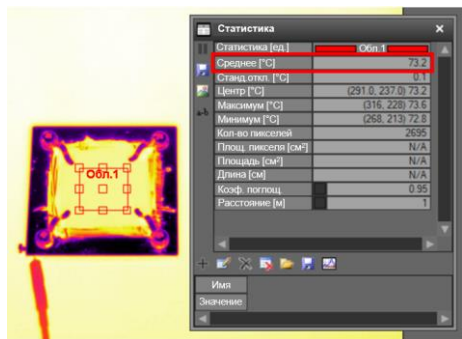
- ❖ **SiC (размером от 0,5 и 1 мм)**
- ❖ **Уголь (мелкодисперсный, 0,15 мм)**
- ❖ Графитовая пыль

Определение коэффициента поглощения покрытий

Измерительный стенд



Измерение среднего значения



Вычисление коэффициента поглощения покрытий

$$A_{\text{реал}} = \frac{A_{\text{уст}}(T_{\text{изм}}^4 - T_{\text{окр}}^4)}{T_{\text{терм}}^4 - T_{\text{окр}}^4}$$

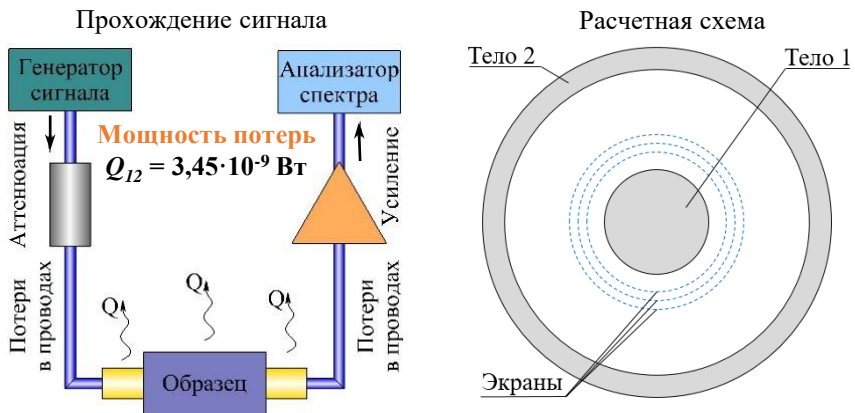
$A_{\text{уст}}$ – установленный коэффициент поглощения
 $T_{\text{изм}}$ – температура на тепловизоре
 $T_{\text{терм}}$ – температура с термопары
 $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды

Результаты измерений пяти лучших покрытий

№ п/п	Покрытие	Коэффициент поглощения	Фото поверхности	Изображение с тепловизора
1	Stycast → SiC 0,5 мм → Stycast → уголь активированный	0,952±0,026		
2	Stycast → SiC 1 мм → Stycast → уголь активированный	0,948±0,026		
3	Stycast	0,943±0,026		
4	Stycast → уголь активированный	0,940±0,026		
5	Stycast → SiC 1 мм → Stycast → SiC 0,5 мм → Stycast → уголь активированный	0,931±0,025		

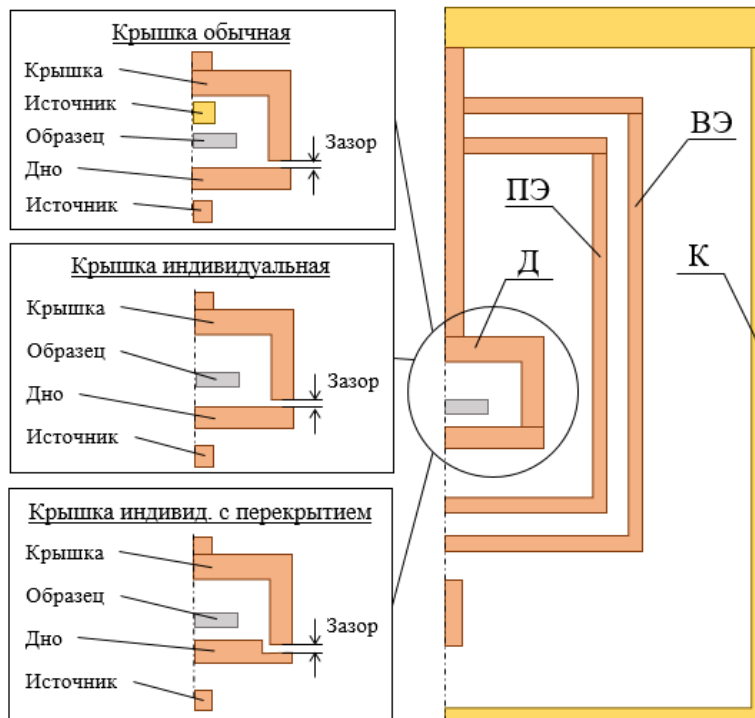
Расчет и моделирование потока теплового излучения

Расчет по теории теплопередачи излучением



Численное моделирование методом конечных элементов

Осесимметричная модель



1

Температура чипа при его охлаждении

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{Q_{1,2}}{c_0(A_{1,2(В)}F_{1(В)} + A_{1,2(Н)}F_{1(Н)})} + T_2^4}$$

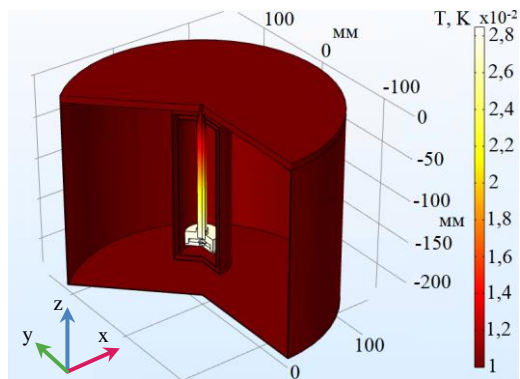
2

Температура чипа при внешнем источнике излучения

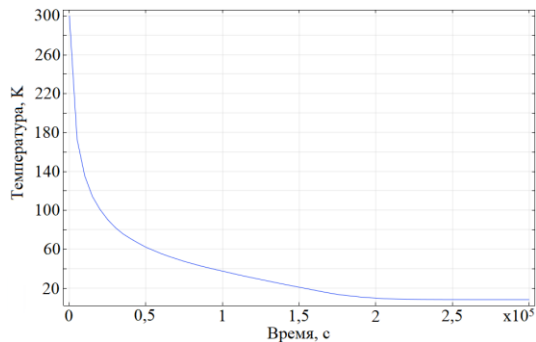
$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{Q_{(1,2)Э}}{c_0(A_{(1,2)Э(В)}F_{1(В)} + A_{(1,2)Э(Н)}F_{1(Н)})} + T_2^4}$$

Расчет и моделирование потока теплового излучения

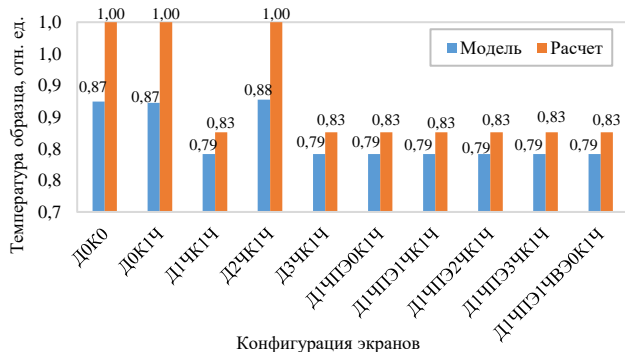
Распределение температуры



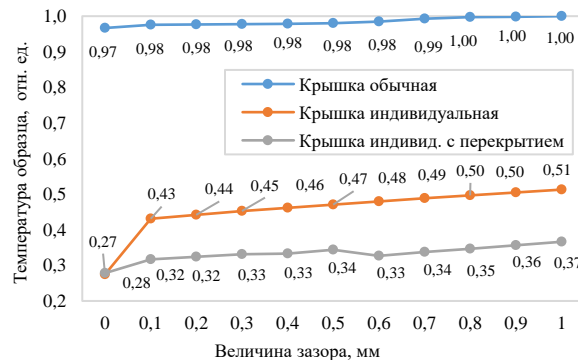
Температура чипа во времени



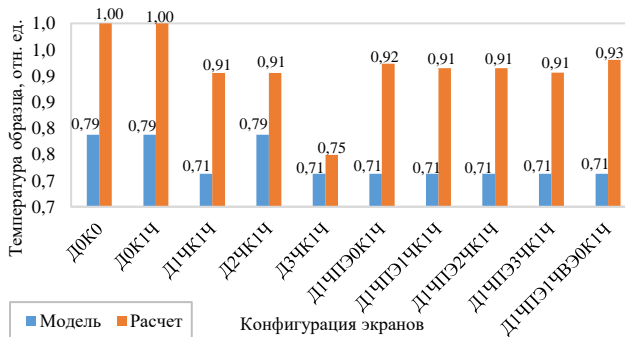
Температура образца при его охлаждении



Исполнение крышки держателя



Температура образца при внешнем источнике



Рекомендации по ИК экранированию

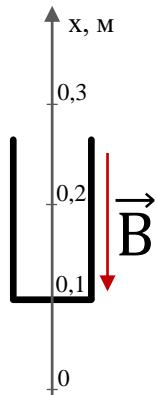
- ❖ Внутренняя поверхность держателя определяет эффективность охлаждения чипа, поэтому должна быть поглощающей.
- ❖ Зазоры между крышкой держателя и дном не должны превышать 0,1 мм.
- ❖ Наиболее простое, но эффективное экранирование, Д1ЧК0.

Принципы экранирования от ЭМ поля

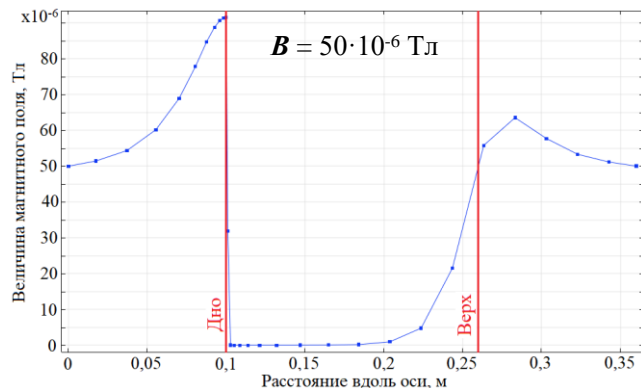
	Электромагнитное (ЭМ) поле		
	Магнитное поле	Электрическое поле	
	DC (+НЧ до 1 кГц)	AC	DC
Требования	Металлы с большой μ_r	<ol style="list-style-type: none">1. Сверхпроводники2. Металлы с малой δ3. Экраны с РПМ	<ul style="list-style-type: none">❖ Хороший проводник❖ Тщательное заземление❖ Надежное соединение отдельных частей экрана
Материалы	Мю-металл (криперм)	<ol style="list-style-type: none">1. Алюминий2. Медь / мю-металл3. Порошковые РПМ на меди	Медь
Применение	<ul style="list-style-type: none">❖ Экран❖ Индивидуальный экран	<ol style="list-style-type: none">1. Держатель или экран2. Держатель/индивид. экран3. Дополнительный экран	<ul style="list-style-type: none">❖ Держатель❖ Основа ИК экрана

Моделирование распределения индукции магнитного поля

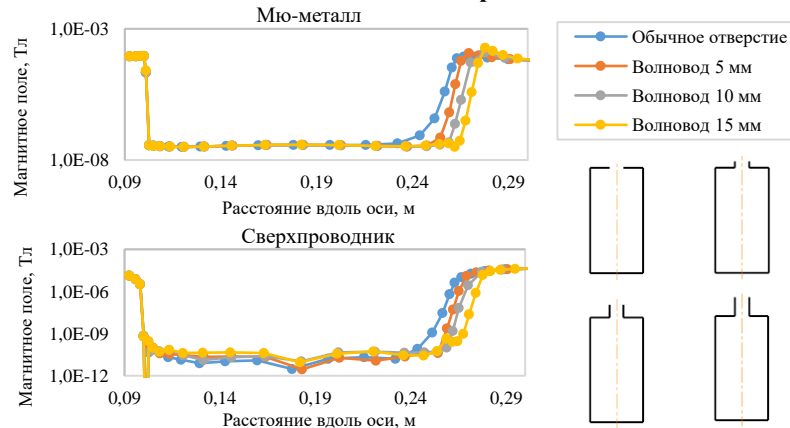
Расчетная схема



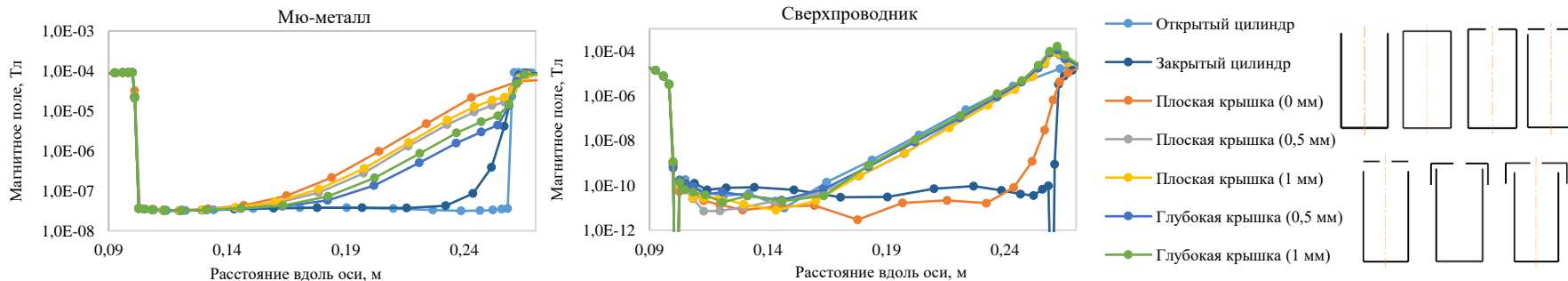
Распределение магнитной индукции вдоль оси модели



Исполнение отверстия

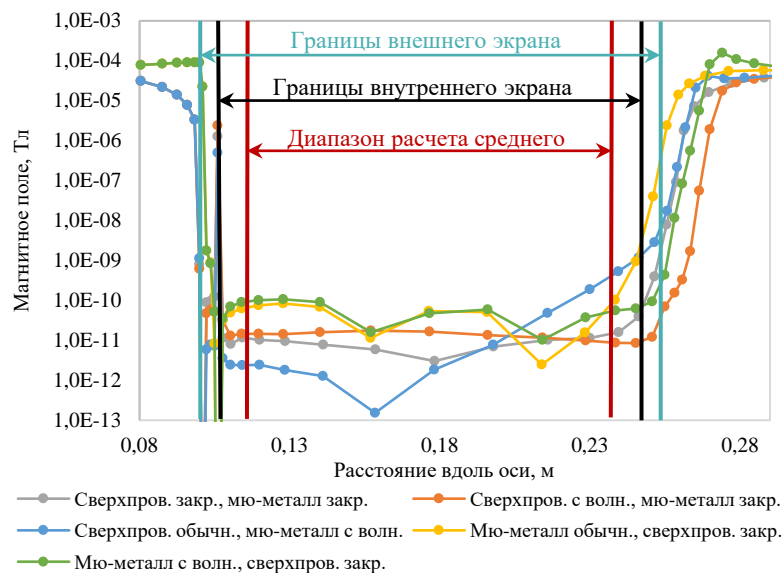


Исполнение крышки



Моделирование распределения индукции магнитного поля

Сравнение двухслойных систем экранирования



Результаты моделирования пяти лучших систем

№ п/п	1	2	3	4	5
Сечение					
Распределение поля					
Среднее значение поля, Тл	$8,9 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$5,9 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Эффективность экранирования, дБ	67,5	65,8	59,3	55,5	54,1
Количество элементов, шт	4	4	4	3	3

Рекомендации по экранированию от магнитного поля

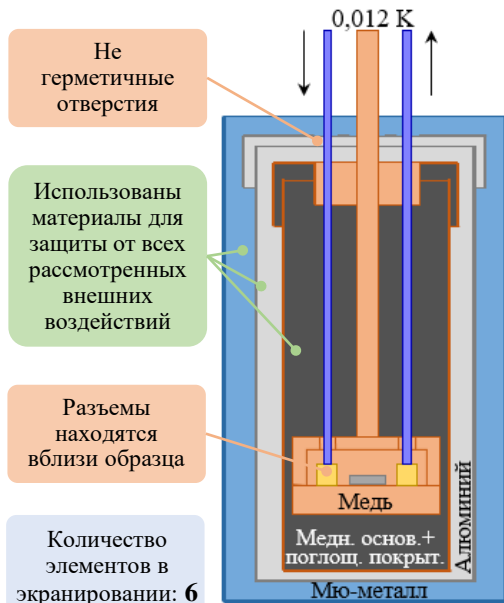
- ❖ Самый простой вариант двухслойного экранирования: цилиндрический мю-металлический экран снаружи, алюминиевый экран с закрытой крышкой и отверстиями под ввод СВЧ кабелей – внутри.
- ❖ Отверстия под ввод кабелей необходимо делать в виде волновода длиной не менее 10 мм.

Положение, выносимое на защиту

1. Установленные в результате моделирования зависимости позволяют количественно определить влияние конструктивных элементов систем экранирования на эффективность подавления внешнего ИК излучения и магнитного поля.

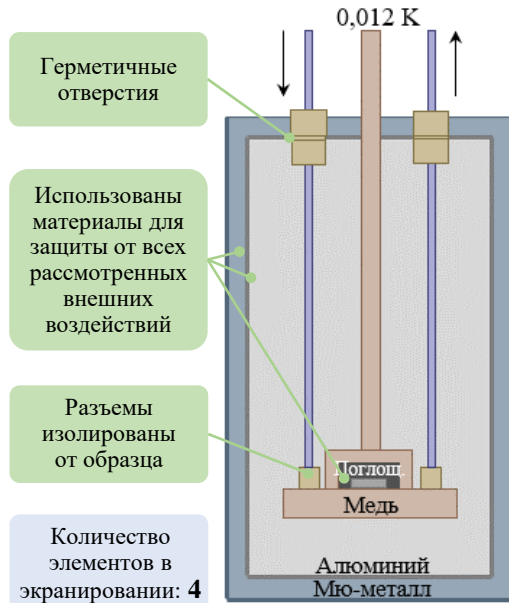
Системы экранирования для тестирования

Вариант наиболее часто применяемой системы (Экраны 1)



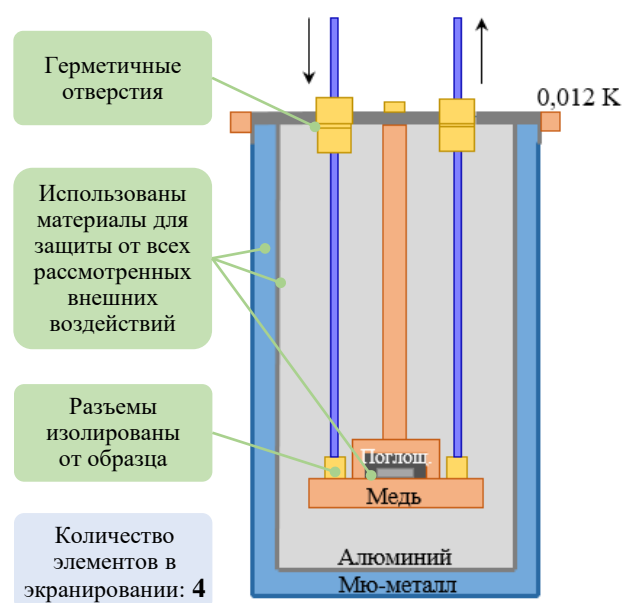
Изготовлена

Система экранов, спроектированная по результатам расчетов (Экраны 2)



НЕ изготавливалась

Система экранов, созданная с учетом оснастки для крепления внутри криостата (Экраны 2 (Al))



Изготовлена

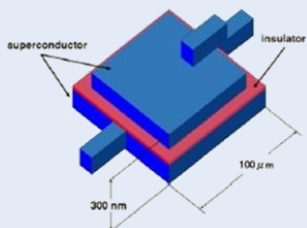
Положение, выносимое на защиту

2. Сформулированные рекомендации по проектированию систем экранирования сверхпроводниковых структур позволяют разработать систему экранирования с улучшенной эффективностью в технологическом оборудовании для измерения параметров сверхпроводниковых структур.

Оценка эффективности экранирования детекторами

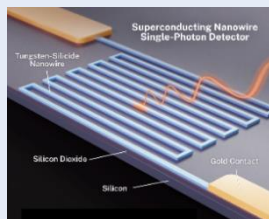
Детекторы ИК излучения

Superconducting Tunnel Junction – STJ



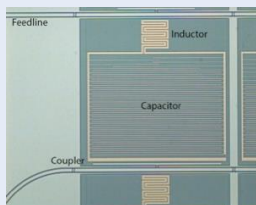
<https://sci.esa.int/web/sci-fmi/-/33525-stj-detectors>

Superconducting Nanowire Single Photon Detector – SNSPD



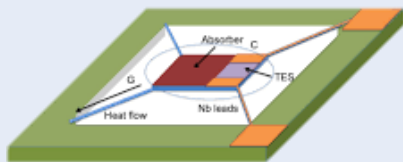
<https://www.nist.gov/image/superconducting-nanowire-single-photon-detector>

Microwave Kinetic Inductance Detector – MKID



<https://web.physics.ucsb.edu/~bmazin/mkids.html>

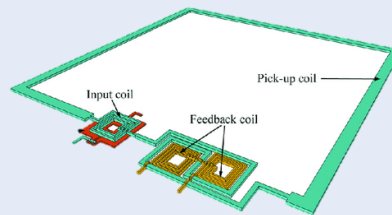
Transition Edge Sensor – TES



P. D. Mauskopf, PASP, 130, 082001, 2018

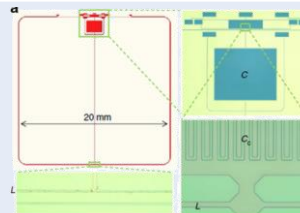
Детекторы магнитного поля

Superconducting QUantum Interference Magnetometer – SQUIM



S. Rombetto [et al.], Sensors, 14(7), 12114, 2014

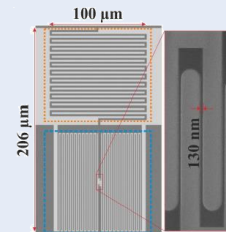
Kinetic Inductance Magnetometer – KIM



J. Luomahaara [et al.], Nat Commun 5, 4872, 2014

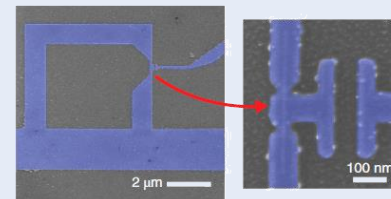
Детекторы электрического поля

Microwave Kinetic Inductance Nanowire Galvanometer – MKING



S. Doerner [et al.], J Phys Commun, 2, 025016, 2018

Charge QUantum Interference Device – CQUID



S. E. de Graaf [et al.] Nature Phys, 14, 590–594, 2018

Оценка эффективности экранирования детекторами



Анализ детекторов на основе сверхпроводниковой структуры

Критерий сравнения	Время релаксации	Штарковский сдвиг	Зарядовая четность
Разрешающая способность	Низкая (всего 1,8% для двух разных систем: с экраном и без)	Средняя (эксперименты опираются на расчетные значения из таблиц)	Высокая (можно наблюдать за отдельными случаями туннелирования квазичастиц)
Скорость измерений	Низкая (необходимо большое количество измерений для накопления статистики)	Низкая (требуется большой объем измерений для широкого диапазона излучения)	Высокая (при условии реализации «single shot» измерений)
Дополнительное оборудование и/или устройства	Калиброванный источник излучения	Широкодиапазонный источник излучения	Параметрический усилитель
Дополнительные расчеты и эксперименты	Облучение кубита калиброванным источником излучения для вычисления вклада других источников в скорость релаксации кубита	Расчет справочных таблиц на основе моделирования работы кубита	Не требуются
Особые требования к интегральной схеме	- $E_J/E_C \sim 50$ - Как можно большее число кубитов на чипе	Не предъявляются	$E_J/E_C \sim 20$
Конструктивные сложности при реализации измерений	Требуется подъемный механизм для экранов	Требуется установка источника излучений	Отсутствуют

Алгоритм оценки эффективности экранирования

Характеризация кубита-детектора

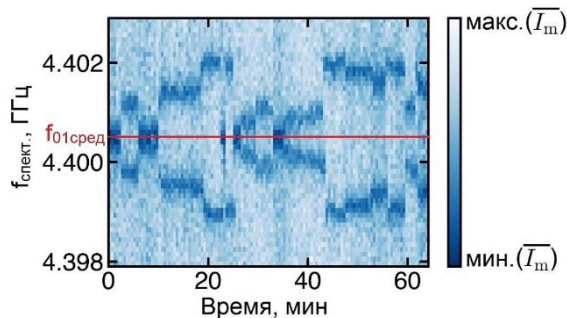
- ❖ Определение средней частоты кубита $f_{01\text{сред}}$
- ❖ Нахождение времени релаксации T_1
- ❖ Определение времени когерентности T_2

Измерение переключений зарядовой четности

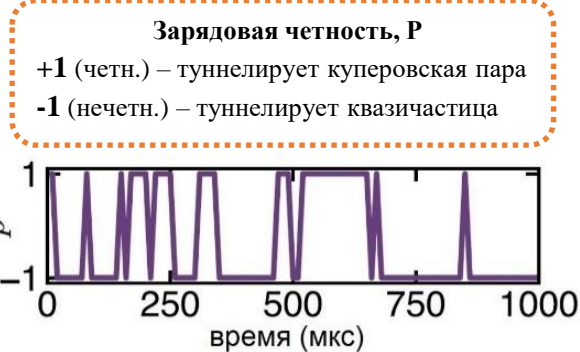
- ❖ Проведение интерферометрии Рамзи, определение $\delta f_{01}(n_g)$
- ❖ Измерение переключений зарядовой четности
- ❖ Определение времени жизни зарядовой четности T_P

Расчет критериев оценки экранов и их сравнение

- ❖ Расчет нормализованной плотности квазичастиц в сверхпроводнике x_{qp}
- ❖ Нахождение эффективной температуры кубита T_{eff}
- ❖ Сравнение экранов по трем параметрам: T_P , x_{qp} , T_{eff}



Serniak Kyle, PhD Dissertation, 2019



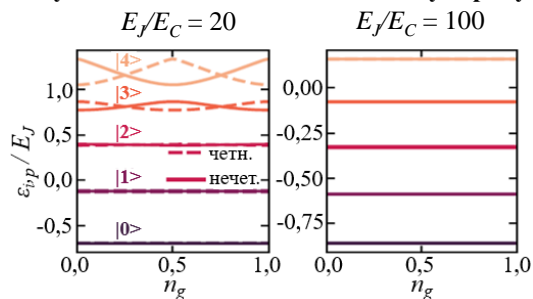
$$x_{qp} \approx \frac{1}{T_P} \sqrt{\frac{\pi^2 \hbar}{2\omega_q \Delta}}$$

$$\left. \begin{aligned} x_{qp} &= x_{qp}^{th} + x_{qp}^{ne} \\ x_{qp}^{ne} &= x_{qp}(T_{0,01}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow T_{eff}$$

$$x_{qp}^{th} = \sqrt{\frac{2\pi k_B T_{eff}}{\Delta}} e^{-\frac{\Delta}{k_B T_{eff}}}$$

Расчет электрических параметров кубита-детектора

Чувствительность к наведенному заряду



Serniak Kyle, PhD Dissertation, 2019

Основное условие $E_J/E_C \sim 20$

Расчет электрических параметров кубита

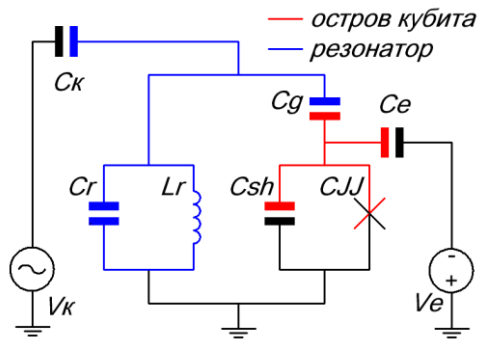
$$\hat{\mathcal{H}} = \underbrace{\frac{\hat{\phi}_r^2}{2L_r} + \frac{(C_q + C_g)\hat{Q}_r^2}{2C_*^2}}_{\text{resonator}} + \underbrace{\frac{(C_g + C_k + C_r)\hat{Q}_q^2}{2C_*^2} - E_J \cos \frac{2e}{\hbar} \hat{\phi}_q}_{\text{qubit}} + \underbrace{\frac{C_g \hat{Q}_r \hat{Q}_q}{C_*^2}}_{\text{coupling}}$$

$$= \hbar \omega_r \hat{a}^\dagger \hat{a} \otimes \hat{\mathbb{I}}_q (\hat{\mathcal{H}}_r) + 4E_C \hat{\mathbb{I}}_r \otimes \hat{n}^2 - \frac{E_J}{2} \hat{\mathbb{I}}_r \otimes \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |n+1\rangle \langle n| + |n\rangle \langle n+1| (\hat{\mathcal{H}}_q) -$$

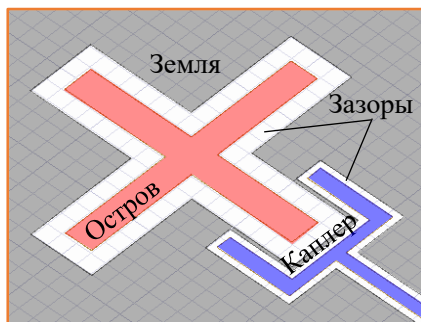
$$- 2e \frac{C_g}{C_*} \sqrt{\frac{\hbar \omega_r}{2(C_q + C_g)}} i(\hat{a}^\dagger - \hat{a}) \otimes \hat{n} (\hat{\mathcal{H}}_i)$$

$\hat{n} \rightarrow \hat{n} - n_g + \frac{P-1}{4}$ — замена в Гамильтониане

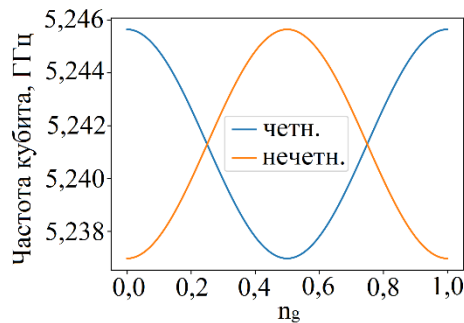
Электрическая схема



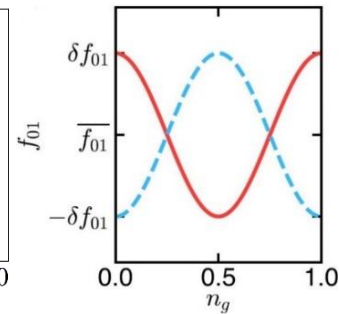
Расчетная схема



Результат моделирования

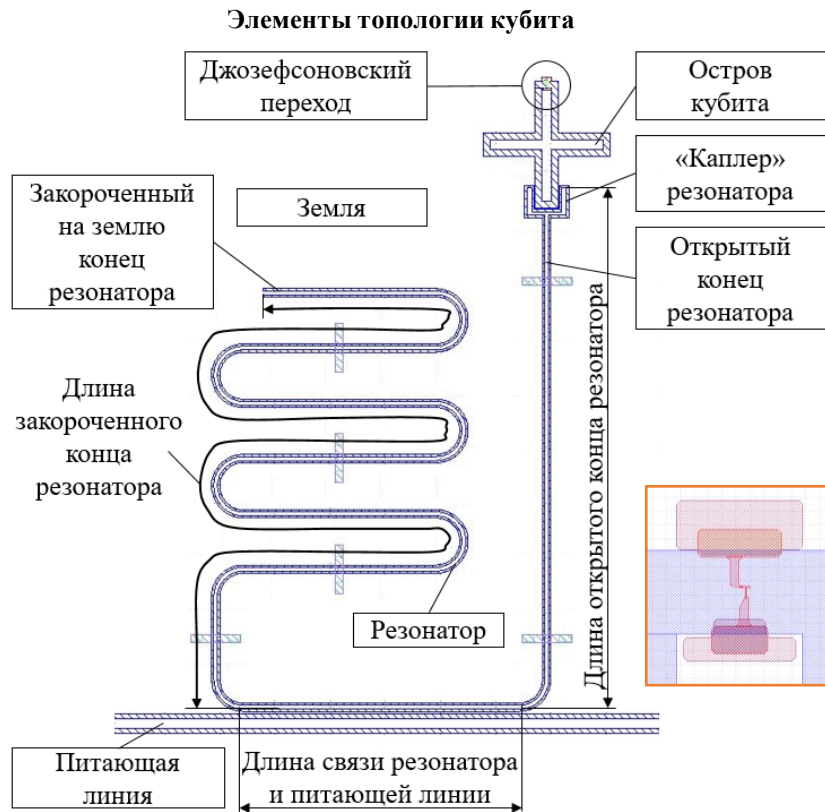


Данные из литературы

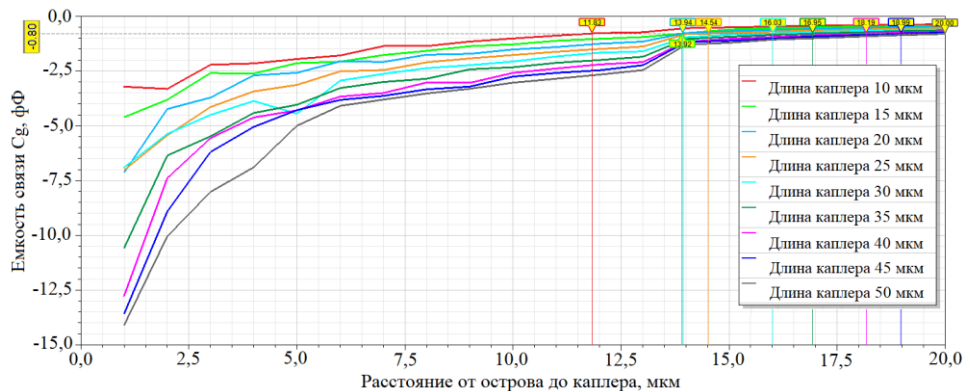


Serniak Kyle, PhD Dissertation, 2019

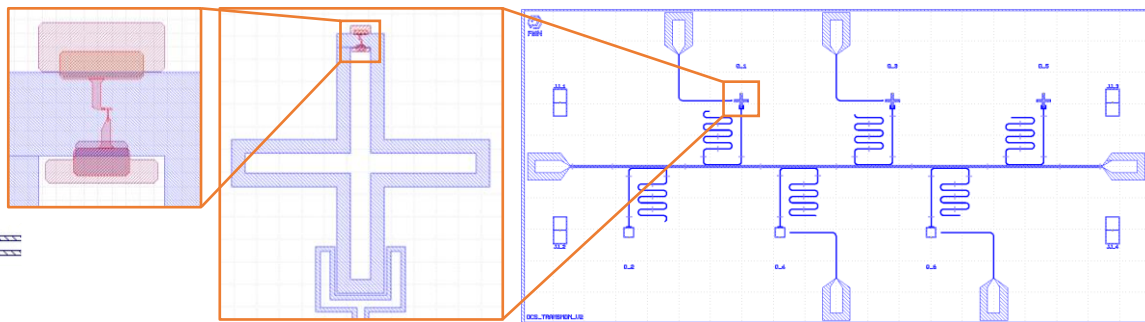
Расчет размеров элементов топологии кубита-детектора



Расчет емкости для различных размеров острова и зазора

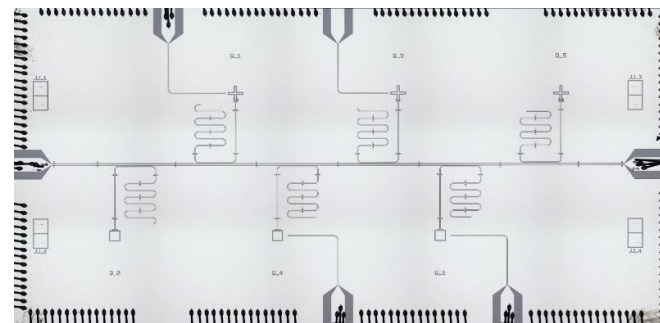


Разработанная топология устройства

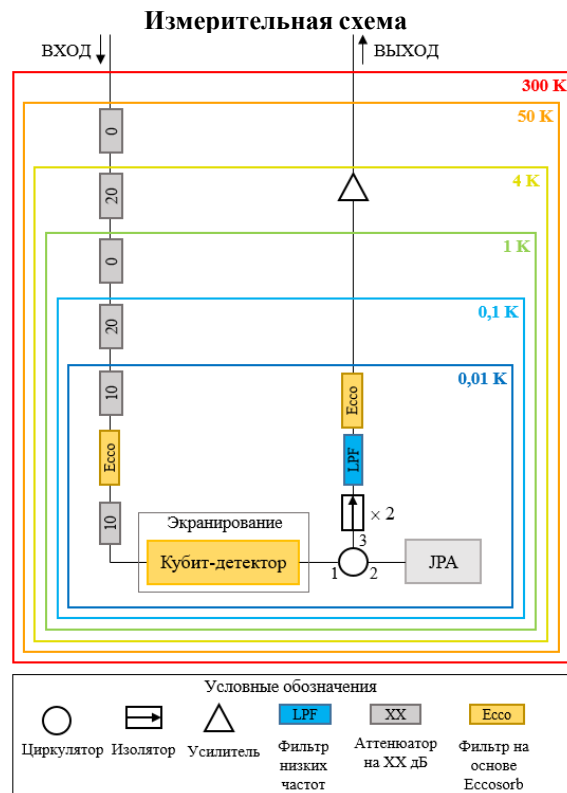




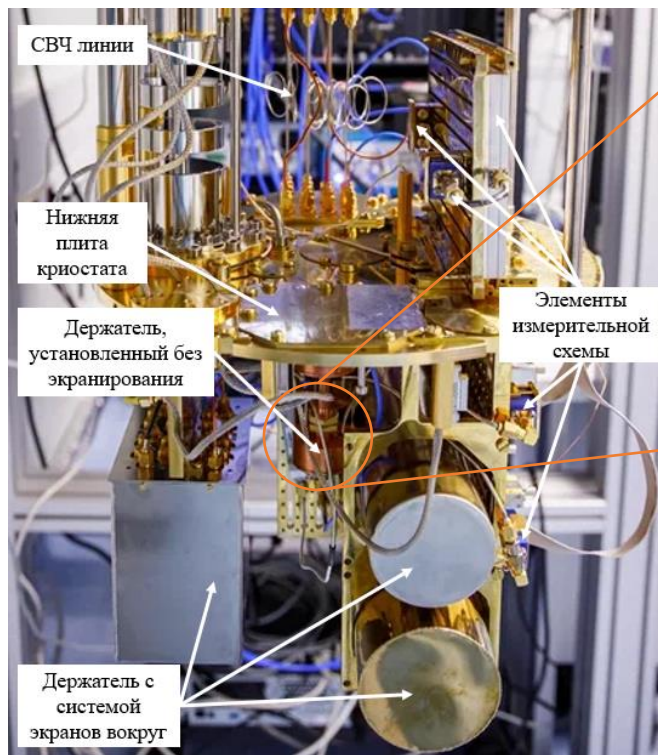
Чип кубита-детектора, разваренный на плату



Экспериментальный стенд для тестирования экранов



Размещение держателя внутри криостата

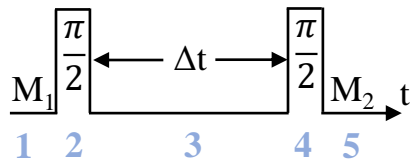


Держатель образца

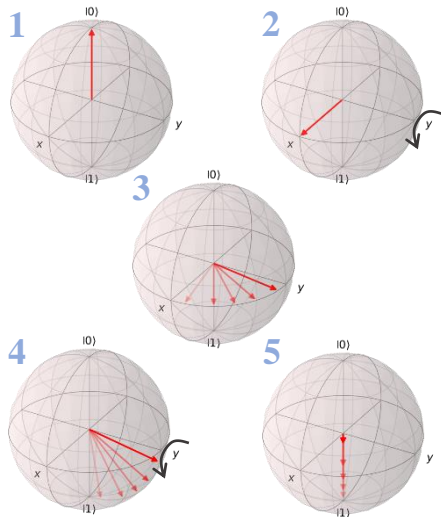


Характеризация кубита-детектора

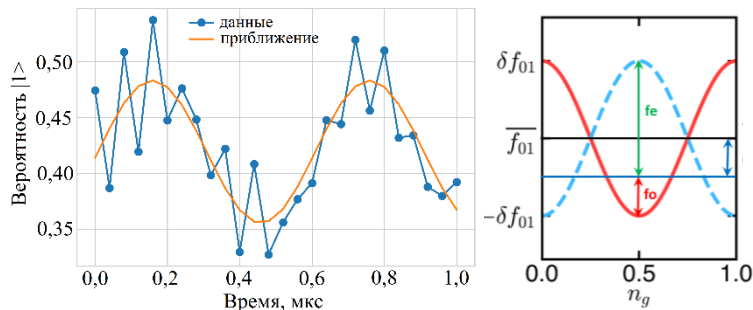
Последовательность импульсов



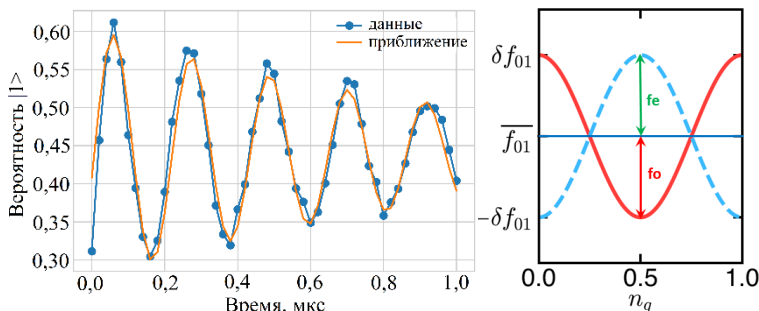
Эволюция вектора состояния на сфере Блоха



Две частоты на осцилляциях Рамзи



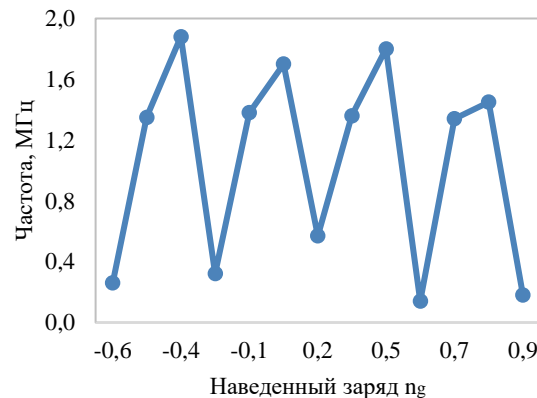
Одна частота на осцилляциях Рамзи



Отработана техника измерений осцилляций Рамзи для проведения измерений $\Delta f_{01}(n_g)$

Изменение Δf_{01} от наведенного заряда n_g

$n_g = C_g V_g / 2e$ – создание наведенного заряда подачей V_g

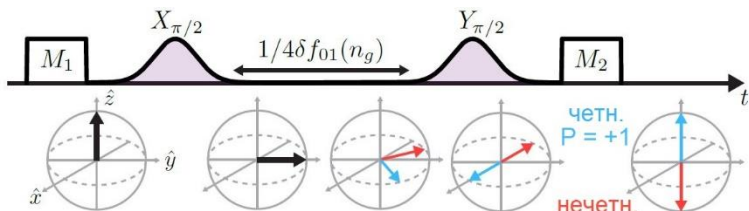


Измеренные параметры кубита-детектора

- ❖ Частота кубита 4,6 ГГц
- ❖ Колебания частоты кубита 1,94 МГц

Измерение переключений зарядовой четности

Последовательность импульсов



Переключения зарядовой четности P во времени

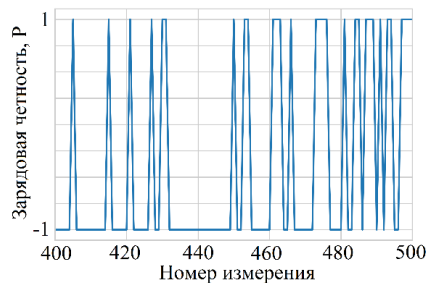
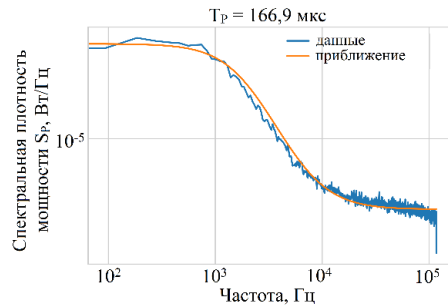
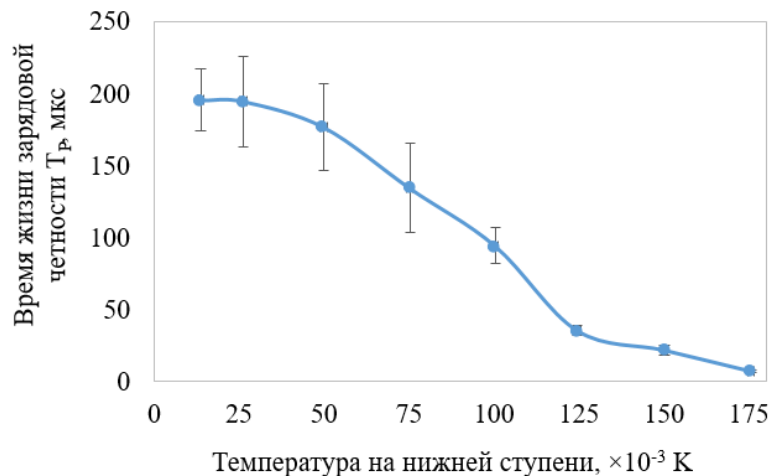


График спектральной плотности мощности



Зависимость T_P от температуры нижней ступени криостата



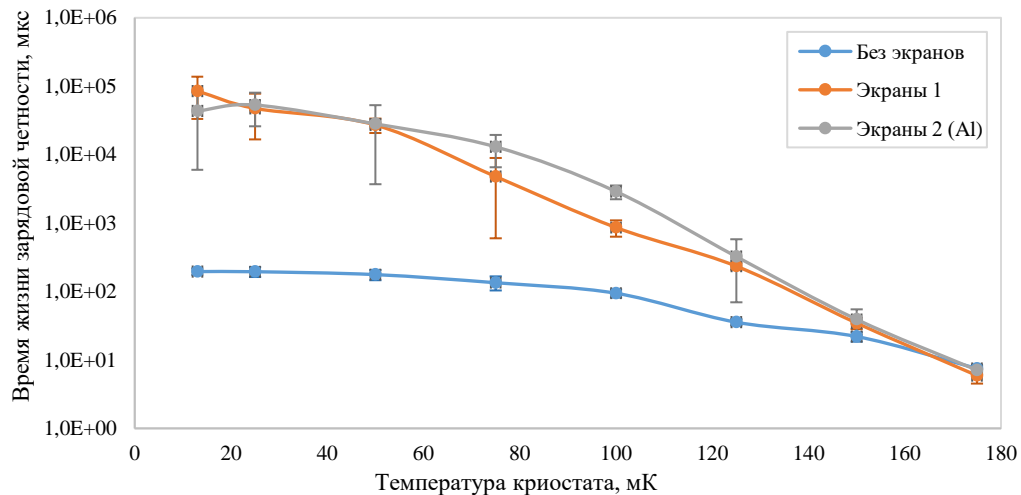
Результаты измерений кубита-детектора без экранирования

№ п/п	Параметр	Значение
1	Время жизни зарядовой четности T_P , мкс	195 ± 21
2	Нормализованная плотность квазичастиц x_{qp}	$1,23 \cdot 10^{-7}$
3	Эффективная температура кубита T_{eff} , К	0,124

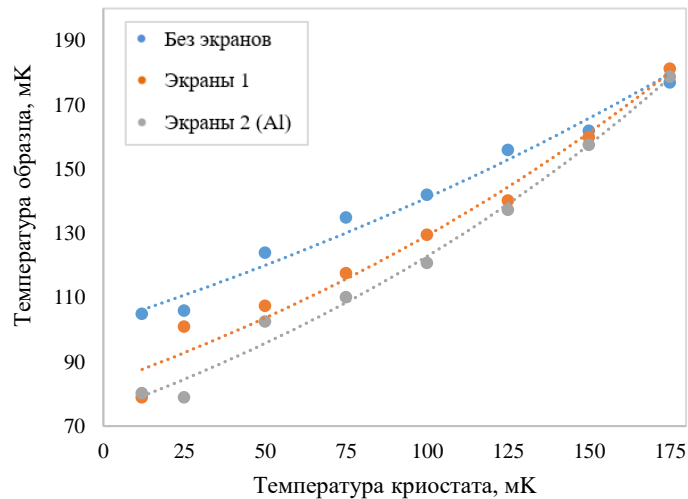
$$S_P[f] = \frac{4 \mathcal{F}^2 / T_P}{(2/T_P)^2 + (2\pi f)^2} + (1 - \mathcal{F}^2) \Delta t_{exp} \quad \text{— Лоренциан случайного телеграфного сигнала}$$

Экспериментальная оценка эффективности систем экранирования

Измерение времени жизни зарядовой четности



Расчет эффективной температуры структуры



№ п/п	Параметр	Без экранов	Экраны 1	Экраны 2 (Al)
1	Время жизни зарядовой четности, мкс	195±21	85189±52061	43639±37645
2	Нормализованная плотность квазичастиц	$1,23 \cdot 10^{-7}$	$2,83 \cdot 10^{-10}$	$8,38 \cdot 10^{-10}$
3	Эффективная температура кубита, К	0,124	0,102	0,107

Результаты измерений

- ❖ T_p больше на 2,5 порядка
- ❖ x_{qp} меньше на 2,5 порядка
- ❖ T_{eff} меньше на ~15%

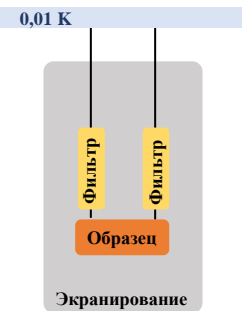
Положение, выносимое на защиту

3. Разработанная методика оценки эффективности систем экранирования, основанная на измерении переключений зарядовой четности, позволяет комплексно определить степень защиты от внешнего ИК излучения и магнитного поля с помощью систем экранирования: оценить изменение количества квазичастиц и частоты их туннелирования, а также величину эффективной температуры сверхпроводниковой структуры.

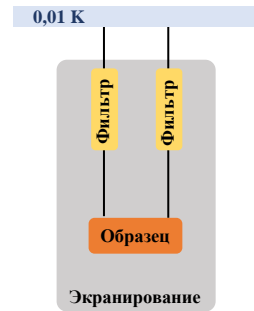
Дополнительные возможности применения методики

Исследование расположения ИК фильтра

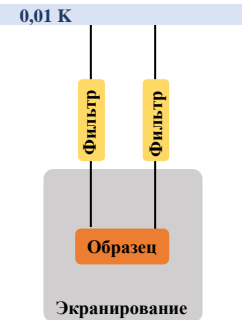
Фильтр на держателе



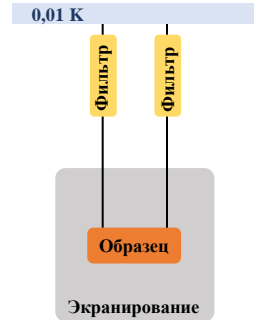
Фильтр внутри экрана



Фильтр за экраном

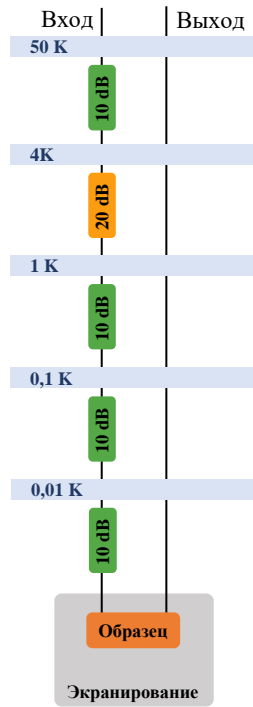


Фильтр на нижней ступени

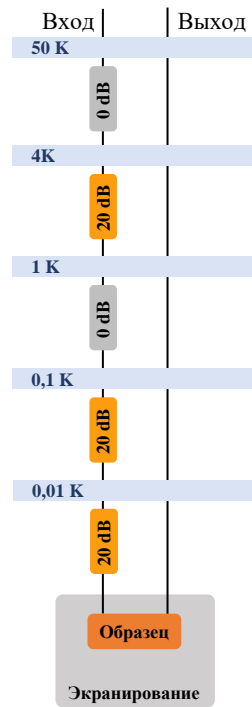


Исследование распределения attenuators по ступеням криостата

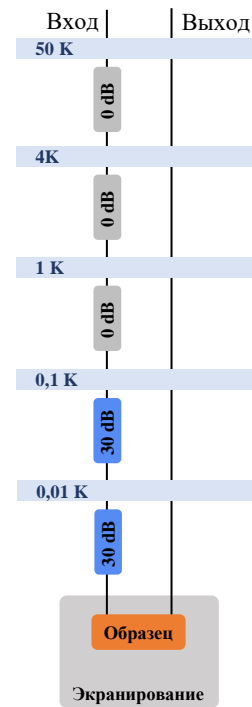
Рекомендация по ступеням



Как сейчас реализовано



Как предлагается сделать



Основные результаты и выводы по работе

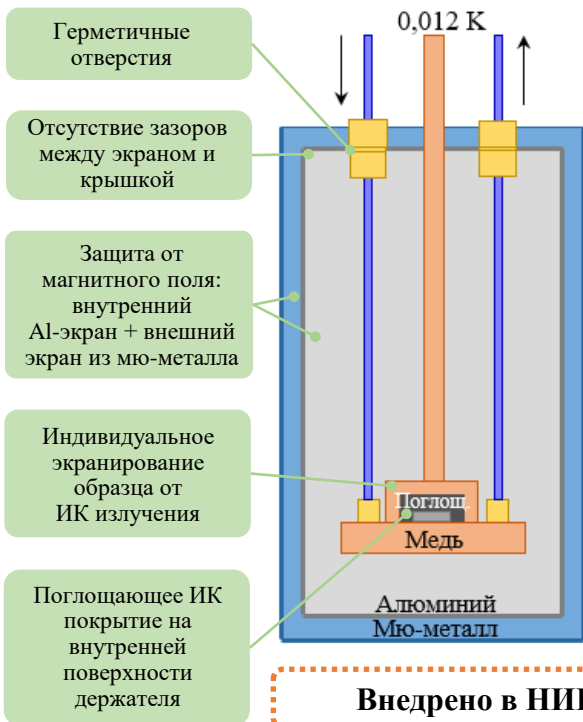
1. На основании литературного обзора установлено, что для защиты сверхпроводниковых структур от внешних воздействий (электромагнитных полей и ИК излучения) используют многоступенчатые системы экранирования, которые различны по конфигурациям, конструктивному исполнению и применяемым материалам, при этом отсутствует расчетно-теоретическое обоснование по выбору материалов для экранов и их конструктивному исполнению, что не позволяет однозначным образом выбрать наиболее эффективную систему экранирования для заданного применения.
2. Для оценки эффективности экранирования рекомендуется использовать свойства самих сверхпроводниковых структур, специально настроенных для восприятия внешних возмущений, поскольку потенциально они окажутся более точными в качестве детектора и более удобными с точки зрения проектирования, изготовления и эксплуатации, чем набор детекторов ИК излучения, электрической и магнитной составляющих поля
3. На основе теории теплопередачи излучением и с помощью уравнений магнитостатики установлены зависимости, позволяющие численно определить влияние конструктивного исполнения систем экранирования на эффективность защиты сверхпроводниковых структур от внешнего ИК излучения и магнитного поля Земли и разработать следующие рекомендации по проектированию систем экранирования:
 - ❖ наиболее значимой с точки зрения более эффективного охлаждения образца является самая близкая к нему поверхность – крышка держателя образца, поэтому для достижения более низкой температуры образца вплоть до 25% рекомендуется эту поверхность делать поглощающей;
 - ❖ как для более эффективного охлаждения образца, так и для защиты от внешних источников излучения экранирования за счет держателя достаточно, поскольку дополнительные экраны вокруг держателя не повышают эффективность, т.е. являются избыточными;
 - ❖ крышку держателя следует изготавливать не в виде общей крышки, покрывающей образец, плату и разъемы, а в виде индивидуального поглощающего экрана, что позволяет снизить температуру образца со сверхпроводниковой структурой примерно в 2 раза;
 - ❖ для достижения минимальных температур сверхпроводниковой структуры конструкция держателя должна быть реализована таким образом, чтобы зазор между дном и крышкой был не более 0,1 мм;

Основные результаты и выводы по работе

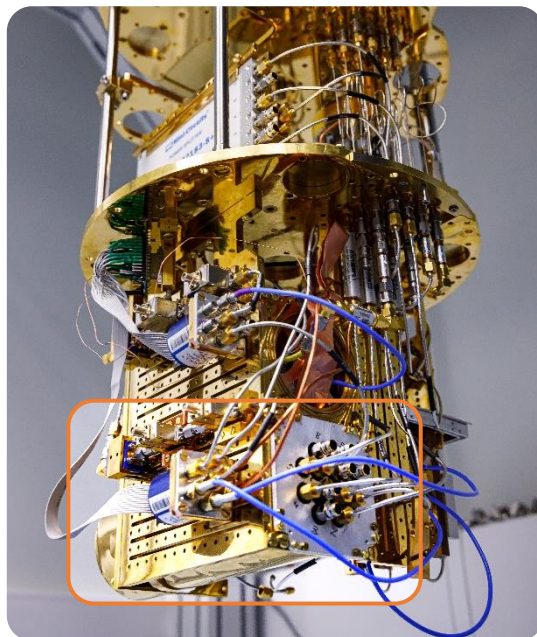
- ❖ крышка экрана от магнитного поля не должна иметь зазоров с основной частью экрана, а отверстия в крышке должны быть выполнены в виде волноводов длиной не менее 10 мм, что позволяет улучшить равномерность индукции магнитного поля внутри экранов от 2 до 3 порядков;
 - ❖ наиболее рациональным с точки зрения технологичности конструкции и высокой эффективности вариантом двухслойного экранирования для защиты от магнитного поля является сверхпроводящий экран с герметичной крышкой и отверстиями под ввод кабелей внутри, мю-металлический цилиндр без крышки снаружи. Такое экранирование обеспечивает индукцию магнитного поля внутри на среднем уровне $1,4 \cdot 10^{-10}$ Тл, это соответствует эффективности экранирования ~ 55 дБ, что на порядок лучше приводимых в литературе данных.
3. Для оценки эффективности экранирования рекомендуется использовать свойства самих сверхпроводниковых структур, специально настроенных для восприятия внешних возмущений, поскольку потенциально они окажутся более точными в качестве детектора и более удобными с точки зрения проектирования, изготовления и эксплуатации, чем набор детекторов ИК излучения, электрической и магнитной составляющих поля.
 4. Для оценки эффективности систем экранирования рекомендуется использовать сверхпроводниковую структуру, чувствительную к зарядовым шумам, поскольку в таком устройстве возможно регистрировать непосредственное туннелирование квазичастиц, что делает оценку экранов более точной и быстрой, а также с меньшим количеством дополнительных расчетов и приспособлений, чем через измерение времени релаксации или определение частоты и амплитуды внешнего электромагнитного поля через измерение Штарковского сдвига.
 5. Для определения комплексного влияния системы экранирования на сверхпроводниковую структуру и сравнения систем между собой рекомендуется использовать методику оценки эффективности систем экранирования, основанную на измерении трех параметров (времени жизни зарядовой четности, нормализованной плотности квазичастиц и эффективной температуры кубита) в сверхпроводниковой структуре, чувствительной к зарядовым шумам, что достигается соблюдением условия, при котором отношение джозефсоновской энергии к зарядовой $E_J/E_C \sim 20$, которое необходимо обеспечить при проектировании детектора.
 6. В результате экспериментальной оценки с помощью разработанной методики установлено, что спроектированная с использованием сформулированных рекомендаций система экранирования позволяет увеличить время жизни зарядовой четности и уменьшить нормализованную плотность квазичастиц на 2,5 порядка, а также снизить эффективную температуру сверхпроводниковой структуры на $\sim 15\%$ по сравнению с неэкранированным образцом, при этом содержит на 30% меньше деталей по сравнению с вариантом наиболее часто применяемой конфигурации экранирования.

Внедрение результатов работы

Рекомендации по проектированию систем экранирования



Система экранирования сверхпроводниковых структур



Методика оценки эффективности систем экранирования

- ❖ Характеризация кубита-детектора
- ❖ Измерение переключений зарядовой четности
- ❖ Определение времени жизни зарядовой четности T_P
- ❖ Расчет нормализованной плотности квазичастиц в сверхпроводнике x_{qp}
- ❖ Нахождение эффективной температуры кубита T_{eff}
- ❖ Сравнение экранов по трем параметрам: T_P , x_{qp} , T_{eff}

Внедрено в НИР проводимой МГТУ им. Н.Э. Баумана и ФГУП ВНИИА – «Лиман» и «ЦПЛ»

Список работ по теме диссертации

1. Toward Highly Efficient Multimode Superconducting Quantum Memory / A.R. Matanin, K.I. Gerasimov, E.S. Moiseev, N.S. Smirnov, A.I. Ivanov, **E.I. Malevannaya** [et al.] // Phys. Rev. Applied. 2023. Vol. 19. P. 034011. (Scopus).
2. Broadband SNAIL parametric amplifier with microstrip impedance transformer / D.A. Ezenkova, D.O. Moskalev, N.S. Smirnov, A.I. Ivanov, A.R. Matanin, V.I. Polozov, V.V. Echeistov, **E.I. Malevannaya** [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2022. Vol. 121. P. 232601. (Scopus).
3. Расчет и моделирование систем экранирования для защиты сверхпроводниковой электроники от ИК излучения / **Е.И. Малеванная**, А.Р. Матанин, В.И. Полозов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2022. Т. 27, № 4. С. 517-529. (БАК РФ).
4. Малеванная, Е. И. Электромагнитное экранирование сверхпроводниковых квантовых схем / **Е.И. Малеванная**, К.М. Моисеев, И.А. Родионов // Наноиндустрия. 2021. Т. 14, № 7-8. С. 446-458. (БАК РФ).
5. Cross Coupling of a Solid-State Qubit to an Input Signal due to Multiplexed Dispersive Readout / D. Pitsun, A. Sultanov, I. Novikov, E. Mutsenik, B. Ivanov, A. Matanin, V. Polozov, **E. Malevannaya** [et al.] // Phys. Rev. Applied. 2020. Vol. 14. P. 054059. (Scopus).
6. Light dressing of a diatomic superconducting artificial molecule / G.P. Fedorov, V.B. Yursa, A.E. Efimov, K.I. Shiiyanov, A.Yu. Dmitriev, I.A. Rodionov, A.A. Dobronosova, D.O. Moskalev, A.A. Pishchimova, **E.I. Malevannaya**, [et al.] // Phys. Rev. A. 2020. Vol. 102. P. 013707. (Scopus).
7. Low-decoherence planar superconducting Josephson qubits for quantum integrated circuits / A.A. Dobronosova, A.I. Ivanov, A.R. Gabidullin, A.A. Pishchimova, D.O. Moskalev, L.A. Ganieva, N.S. Smirnov, V.I. Polozov, A.R. Matanin, V.V. Echeistov, A.V. Zverev, **E.I. Malevannaya** [et al.] // 3rd International School on Quantum Technologies.
8. Improved coherence of superconductive qubits by Josephson junction optimization / A.A. Pishchimova, D.O. Moskalev, A.A. Dobronosova, D.A. Ezenkova, A.R. Matanin, **E.I. Malevannaya** [et al.] // 3rd International School on Quantum Technologies.
9. Over-100 μ s tunable planar transmons: epitaxial Josephson Junctions and design optimization / A.A. Pishchimova, D.O. Moskalev, A.R. Matanin, A.A. Dobronosova, D.A. Ezenkova, **E.I. Malevannaya** [et al.] // Bulletin of the American Physical Society. 2020. Vol. 65. No. 1
10. Investigation of WSi and NbN superconducting single-photon detectors in mid-IR range / A.V. Antipov, V.A. Seleznev, Yu.B. Vakhtomin, P.V. Morozov, D.D. Vasilev, **E.I. Malevannaya** [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 781. P. 012011. (Scopus).
11. Superconducting detector of IR single-photons based on thin WSi films / V.A. Seleznev, A.V. Divochiy, Yu.B. Vakhtomin, P.V. Morozov, P.I. Zolotov, D.D. Vasil'ev, K.M. Moiseev, **E.I. Malevannaya** [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 737. P. 012032. (Scopus).

Спасибо за внимание!