

Создание системы считывания данных с болометра на основе СКВИДа

Шубняков Иван Сергеевич

10 класс, МАОУ «Школа с УИОП №183 им. Р. Алексеева»

Научный руководитель Благодаткин А. В.

инженер лаборатории криогенной нанoeлектроники (ЛКН) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

В работе исследована технология считывания с болометров на холодных электронах, рассчитанных под работу в режиме задания напряжения. Спроектирована система считывания, производится её построение. Проверяется её эффективность на практике путём получения шумовой дорожки со сверхпроводящего квантового интерферометра. После анализа полученного спектра обнаружены внешние шумы на низких частотах (до 100 Гц), связанные с электромагнитными наводками сети 50 Гц, а также вибрациями криостата. При снижении температуры измерений до 300 мК было отмечено снижение уровня внутренних флуктуаций СКВИДа, что подтвердило его работоспособность.

Болометры на холодных электронах – устройства с размерами порядка микрометров (а основного элемента в них – абсорбера – 100×1000 нм). Они принимают электромагнитные волны и частицы, и отправляют данные в виде высокочастотной волны. Но из-за размеров сверхпроводящих болометров и высоких частот считывание данных с них осложнено внешними шумами и внутренними флуктуациями. Наиболее интересными в такой ситуации является считывание при помощи магнитометра – прибора, измеряющего свойства падающего на него магнитного потока. Таким и является СКВИД – сверхпроводящий квантовый интерферометр.

Проблема моей работы заключается в правильном подключении СКВИДа к образцу. Образец должен быть последовательно подключен к петле обратной связи СКВИДа.

Цель моего исследования – улучшение технологии и сборки системы считывания данных с болометра. Метод исследования – экспериментальный лабораторный.

Система считывания состоит из усилителя сигнала, резисторов и СКВИДа. Было решено взять существующий СКВИД калибровочного комплекса Magnicon ввиду отсутствия альтернатив.

Основной параметр, зависящий от болометрической системы, который нужно учесть при подборе усилителя сигнала – NEP – шум, эквивалентный мощности. Это мера чувствительности детекторной системы, определяющая отношение мощности полезного сигнала к шумам при полосе пропускания в один герц. Измеряется в В (или А), делённых на квадратный корень из Гц. NEP системы из 20 болометров равен $1.4 \cdot 10^{-16} \text{ В}/\sqrt{\text{Гц}}$, для системы из 60 болометров $1.6 \cdot 10^{-16} \text{ В}/\sqrt{\text{Гц}}$. Для системы из 32 болометров находится примерно посередине этих значений. Эмпирически был найден подходящий усилитель – ОРА111/AD745. Он обладает низким шумом (до 10 кГц), низким током смещения до 1 пА. напряжение почти не зависит от температуры: до $1 \text{ мкВ} / ^\circ \text{C}$, что важно

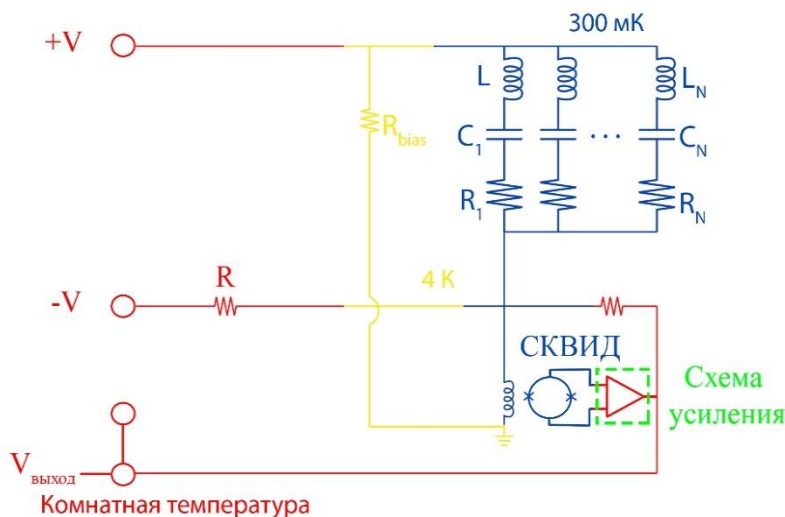


Рисунок 1. Схема системы считывания

при тестировании установки в режиме задания тока. Для подавления шумов низких частот – наводок от сети $\nu = 50$ Гц использовалось отдельное заземление.

Рассмотрим принципиальную электрическую схему установки. Она будет находиться в среде криостата с температурой 4 К и охлаждением болометров до 300 мК. Синим обозначена цепь параллельно соединенных болометров ($L_1 - L_N$, $C_1 - C_N$, $R_1 - R_N$). Параллельное соединение

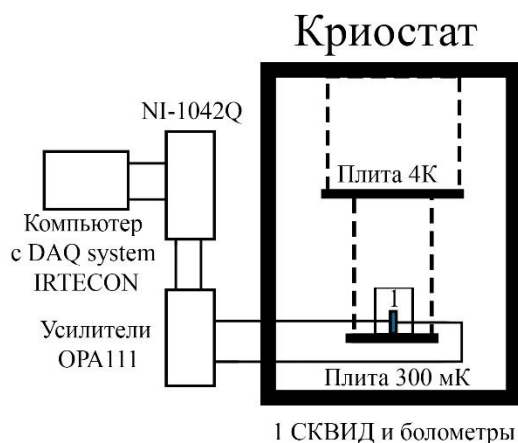


Рисунок 2. Исследовательский стенд

Мера успеха нашей работы - малая зашумленность полученного сигнала, поэтому мы проверили её работоспособность при работе с массивом из 32 болометров. Исследовательский стенд представлен на рисунке 2. Условия проведения: эксперимент проводился в криогенной машине, охлаждаемой от комнатной температуры до 300 мК, основанной на пульсационной (сжатие и расширение гелия) трубе; образец находился в вакууме (10^{-4} мм. рт. ст.); Измерения образца проводились в режиме задачи тока; измерение проводилось по методу четырех точек, так как при этом не учитывается сопротивление соединительных проводов. К первым четырем контактам болометрической системы были подключены резисторы 100 кОм.

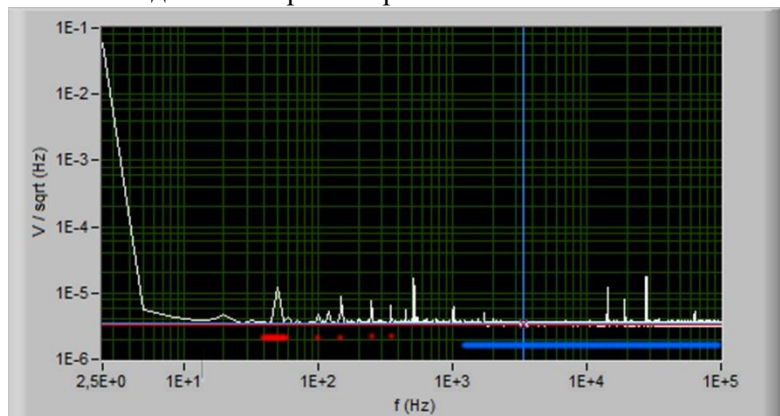
Ход эксперимента:

- 1) Загрузка образцов в криостат
- 2) Запуск криогенной установки, СКВИДа до 300 мК при давлении $4 \cdot 10^{-7}$ Торр.
- 3) Подключение СКВИДа в режиме шумового термометра (задания напряжения)
- 4) Снятие шумовых дорожек
- 5) Обработка экспериментальных данных, сравнение уровней шумов при разных температурах

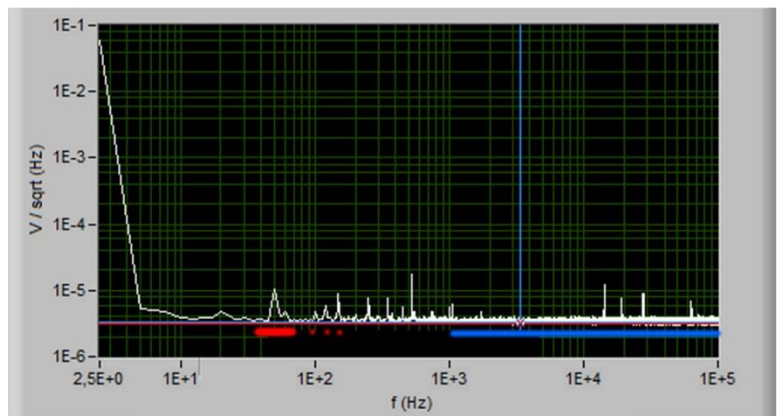
Для построения шумовых спектров используется дискретное преобразование Фурье. Обработка данных (построение спектров) производилась при помощи ПО Magnicon. Каждая шумовая дорожка состоит из 40000 значений.

Результат обработки экспериментальных данных – спектральной плотности шумов (рисунок 3):

обеспечивает меньшие шумы. Антенна от болометров включена в цепь 4 К через резистор R_{bias} , использующийся для задания тока. СКВИД находится в цепи с нормальной температурой, но отдельно от всех остальных компонент охлаждается до 500-300 мК. К нему подведена антенна болометра. СКВИД подключен к схеме усиления. Напряжение задается при помощи изменения сопротивления цепи от 1 МОм до 10 ГОм (резисторы переключаются при помощи реле, т. к. оно даёт минимальную шумовую компоненту). Усилители подключены к СКВИДу через выходы +V и -V; $V_{выход}$ – к цепи считывания. Выходы из цепи используются для передачи показаний на вычислительное устройство и задания тока на болометры.



Спектр при 500 мК



Спектр при 300 мК

Рисунок 3. Сравнение спектров при 300 и 500 мК

1) При температуре 500 мК на спектре мы видим на 50 Гц (красная линия) пик, обусловленный электромагнитными наводками от сети, более мелкие пики (точки) при частоте менее 100 Гц и довольно высокий общий уровень шумов связаны с вибрационными помехами (из-за вибраций криостата). В целом такой результат обуславливается условиями внешней среды. Шумы на более высоких частотах связаны с флуктуациями внутри самого СКВИДа, но они не критичны (т.к. пик узок).

При температуре 400 мК спектр не сильно отличается от рассмотренного ранее.

2) При температуре 300 мК серьёзно уменьшились шумы СКВИДа (синяя линия), внешние флуктуации не изменились.

При снижении температуры до 300 мК снизились внутренние флуктуации СКВИДа, следовательно, он работает правильно. Приемлемый уровень шумов свидетельствует о работоспособности системы считывания на основе СКВИДа.

Заключение. Выполнили многие поставленные задачи. Создана технология считывания данных с болометров, но не закончено построение системы на практике. Планируется установить СКВИД в новый сокет, где не потребуются распайка. Дальнейшая работа может быть направлена на минимизацию внешних шумов улучшением заземления, снижением влияния вибрации криостата и т. д. Кроме этого, будут проведены дальнейшие измерения.

Полученные результаты могут быть использованы для решения прикладных задач в наземной и космической астрономии. Одной из таких в современной радиоастрономии является изучение истории Вселенной по реликтовому излучению. Спектр наполняющего Вселенную реликтового излучения соответствует спектру излучения абсолютно чёрного тела с температурой 2,725 К. Его максимум приходится на частоту 160,4 ГГц. При таких данных лучшим способом измерения реликтового излучения являются болометры с минимальной температурой. Болометры на холодных электронах позволяют решить эту задачу, но для точного считывания данных с них нужна новая система считывания. Основой для неё стал сверхпроводящий квантовый интерферометр.

Литература

1. К. К. Лихарёв. Введение в динамику джозефсоновских переходов. Современные проблемы физики. М: Наука, 1985. 320 с.
2. D. Drung, H. Koch. An integrated DC SQUID magnetometer with variable additional positive feedback. Федеральный физико-технический институт, Берлин. 1993, с 242-245.
3. В. А. Шампоров. Разработка болометрического приемника реликтового излучения вселенной для баллонного телескопа OLIMPO. Выпускная квалификационная работа// Высшая школа общей и прикладной физики. Н. Новгород, 2017
4. Титов К. В. Фильтрация шумов в сигналах с помощью преобразований Фурье // электронный научно-технический журнал «Инженерный вестник» 2017, №6 с. 32-40
5. Ермаков А. Б., Шитов С. В., Барышев А. М., Валерий П. К., Виллем Луинге. A data acquisition system for test and control of superconducting integrated receivers [Электронный ресурс] // Цифровая библиотека IEEE *Xplore*.
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/919475>
6. Л. Кузьмин, А. Панкратов. Болометры на холодных электронах повысят чувствительность будущих космических радиотелескопов [Электронный ресурс] URL:
https://elementy.ru/novosti_nauki/433573/Bolometry_na_kholodnykh_elektronakh_povysyat_chuvstvitelnost_budushchikh_kosmicheskikh_radioteleskopov#forum