

УДК [520.2(470.631) + 535.8]: 520.8.056

СИНИС-ДЕТЕКТОРЫ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА КАК ОСНОВА ПРИЕМНИКА ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОПТИЧЕСКОМ ТЕЛЕСКОПЕ БТА САО РАН

© 2025 М. А. Тарасов^{1*}, А. А. Гунбина^{1**}, А. М. Чекушкин¹, М. А. Маркина¹, Р. А. Юсупов¹, М. Ю. Фоминский¹, Л. В. Филиппенко¹, В. С. Эдельман², В. Ф. Вдовин^{3,4}, В. А. Столяров⁴, И. И. Зинченко³, А. М. Красильников^{3,4}, А. С. Марухно^{3,4}, М. А. Мансфельд^{3,4}, Д. Е. Кукушкин^{4,5}, Д. А. Сазоненко⁴, О. С. Большаков³, А. Б. Ермаков¹, И. В. Леснов³, А. Ф. Валеев⁴

¹Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, 125009 Россия

²Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва, 119334 Россия

³Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород, 603950 Россия

⁴Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия

⁵Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101 Россия

Поступила в редакцию 26 ноября 2024 года; после доработки 3 апреля 2025 года; принята к публикации 6 июня 2025 года

Для наземной астрономии существуют задачи для сверхвысокочувствительных приемников, как для когерентных супергетеродинных, так и для некогерентных, потенциально имеющих более высокую чувствительность. Оба типа приемников основаны на сверхпроводниковых либо охлаждаемых полупроводниковых материалах. В качестве сверхпроводникового некогерентного приемника рассмотрена возможность применения детектора на основе структуры СИНИС (сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник). Проведена оценка предельных параметров таких детекторов в зависимости от материала сверхпроводника, рабочей температуры, режима детектирования. В условиях умеренного охлаждения субкельвинного уровня до 0.28 К отклик алюминиевой СИНИС-структуры может достигать 10^8 Вт⁻¹ и мощность эквивалентного шума $MЭШ = 10^{-17}$ Вт Гц^{-1/2}. В случае ниобиевых СИНИС при 4.2 К, по нашим оценкам, $MЭШ = 1.6 \times 10^{-16}$ Вт Гц^{-1/2}, что также может представлять интерес для ряда практических задач. В САО РАН реализуется проект по разработке прототипа отечественной субтерагерцовой обсерватории в составе оптического телескопа, в рамках которого предполагается установка в фокус Несмита оптического телескопа БТА субтерагерцового (субТГц) СИНИС-приемника. В работе представлен обзор возможных вариантов и техническое предложение СИНИС-приемника, учитывающего особенности используемой оптической зеркальной системы телескопа и окружающего его пространства, а также специфику возможных научных задач.

Ключевые слова: *приборы: адаптивная оптика — субмиллиметровая астрономия — телескопы*

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследования в области миллиметровой и субмиллиметровой астрономии охватывают обширный перечень актуальных научных задач. В качестве примера можно привести такие задачи, как исследование «холодной Вселенной», процессы звездообразования и т. д. Наиболее

чувствительными являются детекторы, выполненные на основе сверхпроводящих материалов и работающие при субкельвинных температурах (ниже 1 К). В зависимости от поставленных задач могут быть использованы как когерентные, так и некогерентные детекторы. Основная проблема — отсутствие на территории России специализированных специализированных телескопов субтерагерцового (субТГц) диапазона, и здесь возможность использования большого оптического телескопа открывает много новых возможностей.

*E-mail: tarasov@hitech.cplire.ru

**E-mail: aleksandragunbina@mail.ru

Впервые в литературе идею внедрения сверхпроводникового приемника субТГц-диапазона на телескопе БТА САО РАН предложили Vystavkin et al. (2007), но сами работы были начаты еще в 1990-х годах, однако не были завершены в связи с отсутствием финансирования. Позднее их возобновили, и первые оценки приведены в публикациях Yakorov et al. (2018) и Balega et al. (2024).

Нетрудно оценить ожидаемые радиоастрономические характеристики БТА на миллиметровых волнах. Согласно Balega et al. (2024), потери при отражении от поверхности зеркала БТА (далее ГЗ) в этом диапазоне — около 5% (см. рис. 1). Для сравнения на рис. 2 приведены результаты измерения коэффициента отражения ГЗ в оптическом диапазоне (по данным с сайта САО РАН: <https://www.sao.ru/Doc-k8/Events/2018/MirrorChronicle/>). Оптическое зеркало имеет практически идеальную поверхность для субТГц-диапазона. Его геометрическая площадь составляет примерно 28 м^2 . С учетом потерь на отражение и затенение зеркала можно ожидать коэффициент использования поверхности около 0.7 при «стандартно» гауссовом законе облучения с обрезанием на краю зеркала на уровне -12 дБ (Baars, 2007). Это дает эффективную площадь примерно 19 м^2 . Коэффициент использования основного лепестка диаграммы направленности (main beam efficiency) при этом будет близок к 0.8. Ширина диаграммы направленности (ДН) на половинном уровне по мощности составит $HPBW \approx 1.2 \lambda/D (\text{радиан}) \approx 2'$ на длине волны 3 мм. Это соответствует линейному разрешению 0.6 пк на расстоянии 1 кпк. При переходе на более короткие волны, $\lambda = 1.3 \text{ мм}$ или даже 0.8 мм, характерные для Телескопа горизонта событий¹, ширина ДН и линейное разрешение станут в 2–4 раза меньше и достигнут величин в полминуты и 0.15 пк. Однако место установки БТА не является оптимальным для волн 1.3 мм и тем более 0.8 мм; атмосферное поглощение (св. 0.1 непер) будет сильно ограничивать время, пригодное для эффективных наблюдений на БТА: несколькими десятками ясных дней для 1.3 и вообще менее десятка для 0.8 мм.

Для оценки потенциальной чувствительности БТА как радиотелескопа имеет смысл сначала рассмотреть идеальный случай, когда шумы определяются только атмосферой, а шумами приемника можно пренебречь. Если принять оптическую толщину атмосферы в зените равной 0.1, что более или менее соответствует статистике поглощения

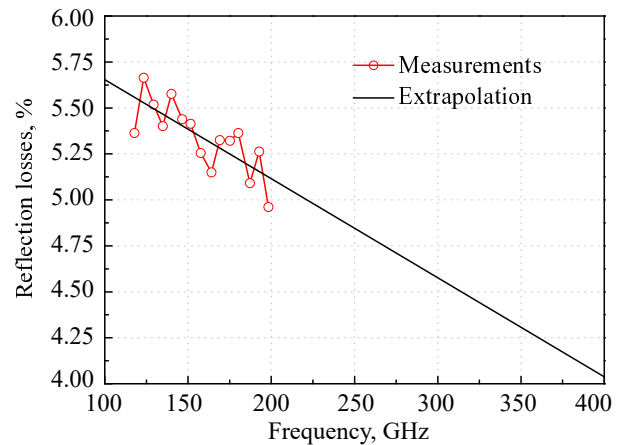


Рис. 1. Потери на отражение от поверхности ГЗ БТА в субТГц-диапазоне: красная кривая — измерения, черная — экстраполяция (рис. 6b из Balega et al. (2024)). Для исследования использовались образцы-«свидетели», напыляемые в одном цикле с ГЗ. Толщина покрытия (около 100 нм) меньше скин-слоя, в данном случае потери на отражение почти не зависят от частоты и составляют несколько процентов.

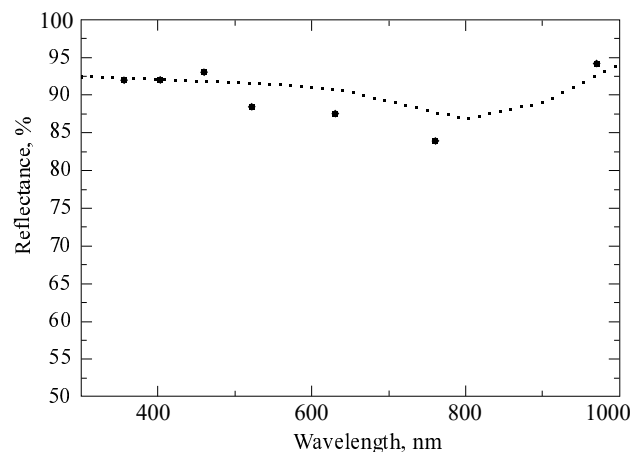


Рис. 2. Коэффициент отражения ГЗ БТА по измерениям с рефлектометром СТ-7. Пунктирная линия — максимальный коэффициент отражения (алюминий), точки — измерения. Подробнее см. <https://www.sao.ru/Doc-k8/Events/2018/MirrorChronicle/>.

на площадке БТА в «хорошие» сезоны (Balega et al., 2024), то яркостная температура неба на среднем зенитном угле 45° составит примерно 35 К. Для полосы приема 10 ГГц в модуляционном режиме температурная чувствительность будет примерно 0.7 мК при времени интегрирования 1 с. Плотность потока, эквивалентная шуму, достигнет $NEFD \sim 100 \text{ мЯн Гц}^{-1/2}$. Надо отметить, что в реальности чувствительность будет ухудшаться вследствие флуктуаций атмосферного поглощения и, соответственно, излучения, которые присутствуют даже в безоблачную погоду. Например, при изменении оптической толщи атмосферы всего лишь

¹<https://www.cfa.harvard.edu/facilities-technology/telescopes-instruments/event-horizon-telescope-eht>

Таблица 1. Основные типы некогерентных детекторов миллиметрового диапазона и их типичные характеристики

Тип*	Крутизна	МЭШ, Вт Гц ^{-1/2}	Частота модуляции	Температура, К	Ссылки
Голей (ОАП) Tydex GC-1P**	10 ⁵ В Вт ⁻¹	10 ⁻¹⁰	20	300	[1]
Пирозлектрик (МГ32)	6 × 10 ³ В Вт ⁻¹	10 ⁻⁹	250	300	[2] [3] [4]
	2.6 × 10 ⁵ В Вт ⁻¹	6 × 10 ⁻⁹	20	300	
		2 × 10 ⁻⁷	20	300	
	10 ⁷ В Вт ⁻¹	6 × 10 ⁻¹⁰	23	300	
Шоттки	6 × 10 ³ В Вт ⁻¹	10 ⁻¹²	1000	300	[5] [6]
		300 × 10 ⁻¹²		300	
	500 × 10 ³ В Вт ⁻¹	10 × 10 ⁻¹²		300	
МДМДМ	40 А Вт ⁻¹	10 ⁻¹²	1000	300	[7]
	2.9 × 10 ³ А Вт ⁻¹	1.6 × 10 ⁻¹⁷		4.2	
СИНИС	2 × 10 ⁸ В Вт ⁻¹	10 ⁻¹⁷	1000	0.3	[8]
		1.6 × 10 ⁻¹⁷		0.27	[9]
БКП (TES)		1.23 × 10 ⁻¹⁷	10 0.1 ÷ 20	0.1	[10]
		7 × 10 ⁻¹⁷		0.51	[11]
		4.7 × 10 ⁻¹⁷		~0.48	[12]
КИД (KID) TKID MKID KID		2 × 10 ⁻¹⁷	~1000	~0.4	[13]
		5 × 10 ⁻¹⁸		~0.1	[14]
		2 × 10 ⁻¹⁹		~0.12	[15]
СИС (STJ)	2 × 10 ³ А Вт ⁻¹	10 ⁻¹⁶	10 ⁹	4.2	[16, 17]
	10 ⁹ В Вт ⁻¹	1.6 × 10 ⁻¹⁶		≤ 0.8	
HTS STJ	7 × 10 ³ В Вт ⁻¹	10 ⁻¹¹ ÷ 10 ⁻¹³ (50 К)		60	[18]
БГЭ (HEB)		3 × 10 ⁻¹⁸	~700	0.05	[19]
RFTES		3 × 10 ⁻¹⁷		0.4	[20]
Графен	7 × 10 ⁴ В Вт ⁻¹	3 × 10 ⁻¹³		25	[21]

* Полные названия типов приведены в тексте (см. раздел 2); ** https://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_devices/golay_cell/. [1] — Golay (1947), [2] — Minin et al. (2021), [3] — Müller et al. (2015), [4] — Paulish et al. (2020), [5] — Prikhodko et al. (2021), [6] — Yadav et al. (2023), [7] — Tarasov et al. (2021b), [8] — Tarasov et al. (2022), [9] — Schmidt et al. (2005), [10] — Nunez et al. (2022), [11] — Sayre et al. (2012), [12] — Henning et al. (2012), [13] — Chai et al. (2024), [14] — Yates et al. (2011), [15] — Bueno et al. (2018), [16] — Ariyoshi et al. (2009), [17] — Ariyoshi et al. (2012), [18] — Du et al. (2015), [19] — Karasik and Cantor (2011), [20] — Merenkov et al. (2022), [21] — Generalov et al. (2024).

на 0.001 яркостная температура неба изменится примерно на 0.3 К, что на порядки превышает приведенную выше оценку чувствительности. Для подавления влияния атмосферных флуктуаций необходимо использовать специальные методы приема, например диаграммную модуляцию.

2. ВИДЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОГЕРЕНТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

По механизмам детектирования микроволновые детекторы и болометры можно разделить на две основные группы: тепловые детекторы и детекторы

фотонов. В первых мощность излучения равномерно распределяется по объему чувствительного элемента, вызывая рост температуры. У вторых поглощение одиночных фотонов вызывает протекание тока через детектор. Эти две большие группы можно разделить еще по материалу; самые распространенные — это полупроводники, сверхпроводники, нормальные металлы. Современный обзор болометров представлен Zhou and Yeow (2024). В таблице 1 приведены типичные характеристики наиболее распространенных детекторов миллиметрового диапазона: детектора Голея (ОАП — оптоакустический преобразователь), пирозлектрического приемника, диода

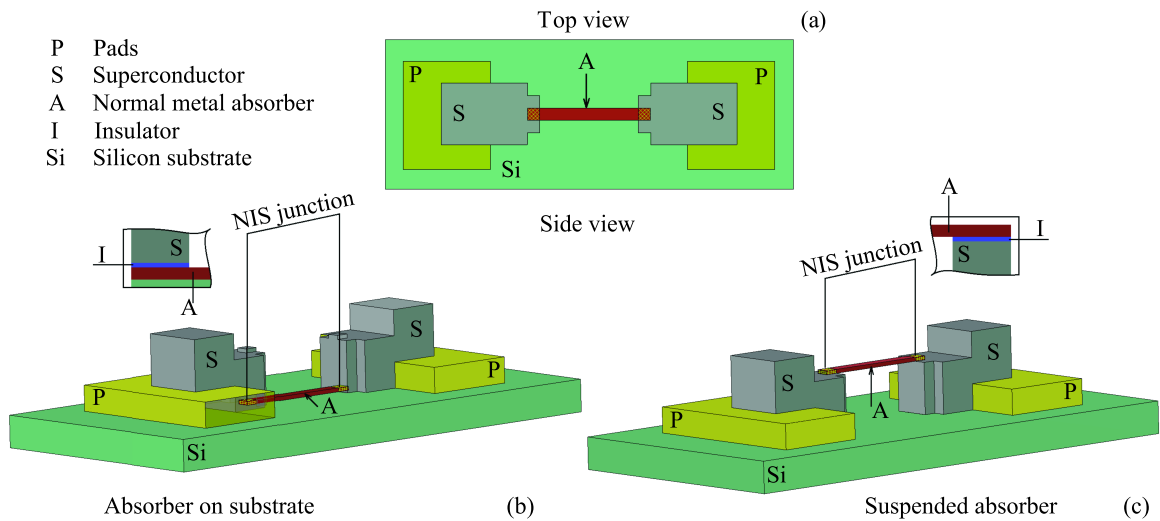


Рис. 3. Схематичное изображение различных конструкций СИНИС-детектора: вид сверху (а), вид сбоку конструкции с поглотителем на подложке (b) и оторванным поглотителем (с).

Таблица 2. Предельные параметры СИНИС: болометрический и квантовый отклики

Режим детектора	Крутизна токового отклика	dI/dP , A W ⁻¹	dV/dP , V W ⁻¹
Фотонный счетчик с электронным охлаждением	e/hf	762	2.6×10^7
Реальный детектор при смещении на половине щели R_d	$2/V_\delta$	5×10^3	1.75×10^8
Квантовый детектор вблизи щели $R_d = 2$ кОм	$e/2kT$	2.2×10^4	4.4×10^7
Электрический болометр на постоянном токе	$2k/(R_d e \Sigma \nu T^4)$	3.7×10^5	1.3×10^{10}

Шоттки, СИНИС (сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник), болометра на краю сверхпроводящего перехода (БКП, Transition-edge sensor—TES), детектора на основе кинетической индуктивности (КИД, KID—Kinetic Inductance Detector: МКИД—Microwave KID, ТКИД—Thermal KID), детектора на СИС-переходе (СИС — сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник, SIS—Superconductor-Insulator-Superconductor, STJ—Superconducting Tunnel Junction), МДМДМ (металл–диэлектрик–металл–диэлектрик–металл), HTS STJ — High-temperature Superconductor (ВТСП — детектора на высокотемпературных сверхпроводниках), болометра на горячих электронах (БГЭ, НЕБ — Hot Electron Bolometer), RFTES (Radio Frequency Transition Edge Sensor) и детектора на основе графена. Усредненные характеристики некоторых неохлаждаемых детекторов можно найти также в Rogalski (2022).

3. МИКРОСТРУКТУРА СИНИС-ДЕТЕКТОРА

Схематичное изображение одиночного детектора структуры СИНИС показано на рис. 3. Чувствительным элементом такого детектора является наноабсорбер (поглотитель), выполненный из нормального металла, который нагревается под действием приходящего излучения.

Для СИНИС-детектора возможны механизмы как болометрического отклика, так и счетчика фотонов (Devyatov et al., 2006). В случае счетчика фотонов токовый отклик стремится к пределу протекания одного электрона при поглощении одного кванта. В режиме квантового болометра возможно мультиплексирование, когда количество протуннелировавших электронов приближается к отношению энергии кванта hf к тепловой энергии kT . Что касается спектральных характеристик, то для СИНИС нет предельного ограничения по частоте.

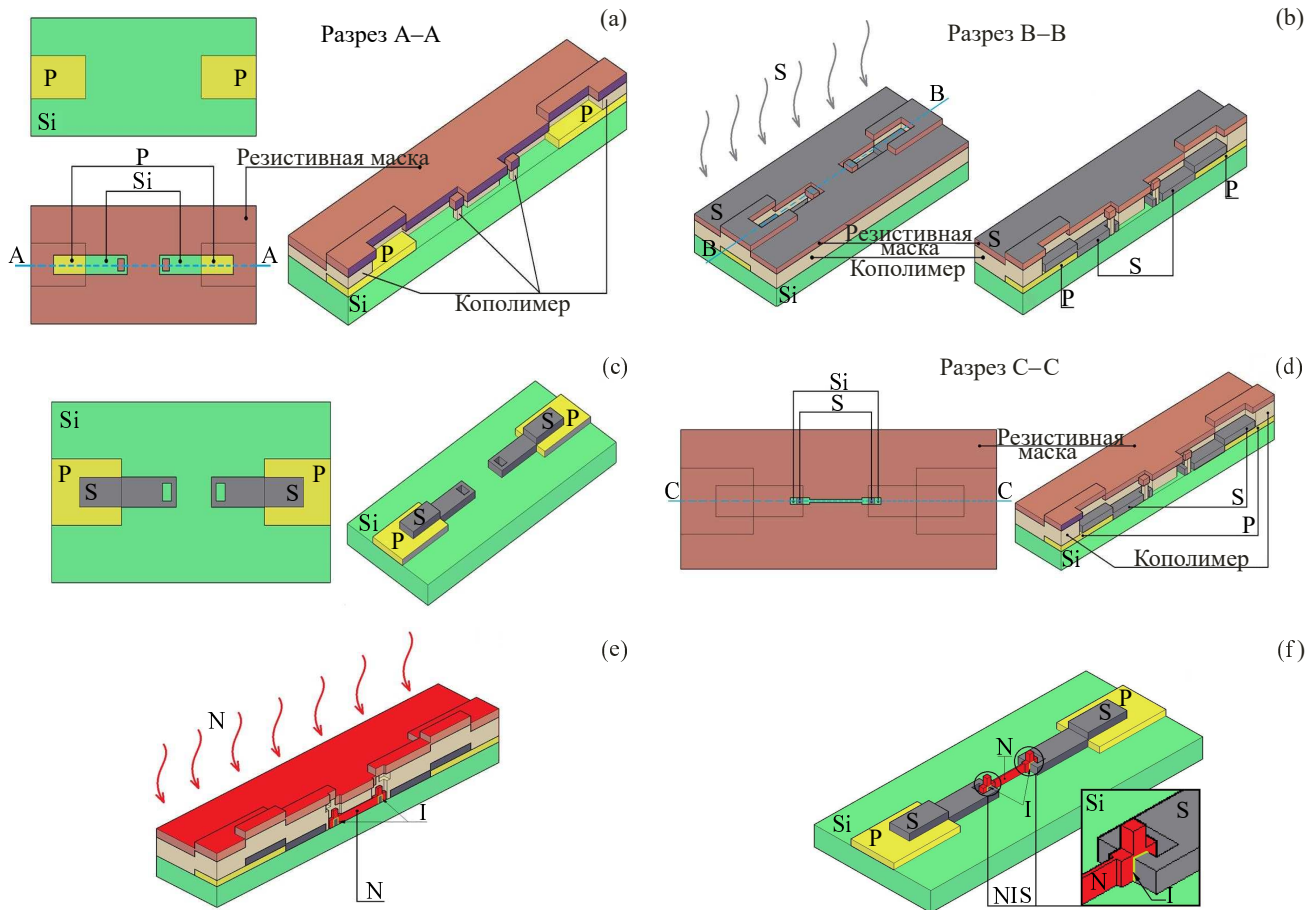


Рис. 4. Схематичное изображение процесса изготовления СИНИС-структуры методом раздельной литографии с магнетронным напылением. Обозначения на рисунке: Si — кремниевая подложка; P — слой PADS, содержащий антенны, соединительные провода и контактные площадки; S — сверхпроводящие электроды (алюминий); I — изолятор (окисленный слой алюминия); N — нормальный металл (палладий). Подробнее об этапах (a)–(f) см. в тексте.

Параметры СИНИС при реализации различных режимов представлены в таблице 2.

4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИНИС-ДЕТЕКТОРОВ

Традиционно изготовление осуществлялось методом теневого напыления алюминиевых пленок, при этом нормальный металл представлял собой тот же алюминий, но с подслоем железа толщиной около 2 нм (для подавления сверхпроводящих свойств алюминиевой пленки). Модификация производства СИНИС-структур с поглотителем на подложке сводилась к напылению в ортогонально расположенные узкие канавки в резисте — так называемая технология Манхэттан. Данный способ позволил избежать использования ненадежных мостиков из резиста, а также дал возможность изготавливать туннельные переходы различных площадей (нами было протестировано изготовление переходов от 0.1×0.1 до 1×1 мкм). Дальнейшее развитие технологий двигалось в сторону исключения теневого напыления и создания

топологии СИНИС-структур с подвешенным (физически оторванным от подложки) поглотителем из нормального металла. В более поздних реализациях в конструкции с подвешенным абсорбером использовались палладий и гафний в качестве нормального абсорбера. Подробно различные технологии изготовления СИНИС-детекторов с нюансами построения топологий рассмотрены в публикации Gunbina et al. (2021b).

На данный момент для создания СИНИС-структур используется технология раздельной литографии с магнетронным напылением (Tarasov et al., 2021a). Суть метода заключается в раздельном формировании слоя со сверхпроводящими электродами и туннельного барьера с нормальным металлом. Для создания туннельного барьера высокого качества изготавливают изолятор путем контролируемого окисления (при заданном давлении кислорода в камере и времени окисления) пленки алюминия. Для этого проводят предварительное травление поверхности сверхпроводящего

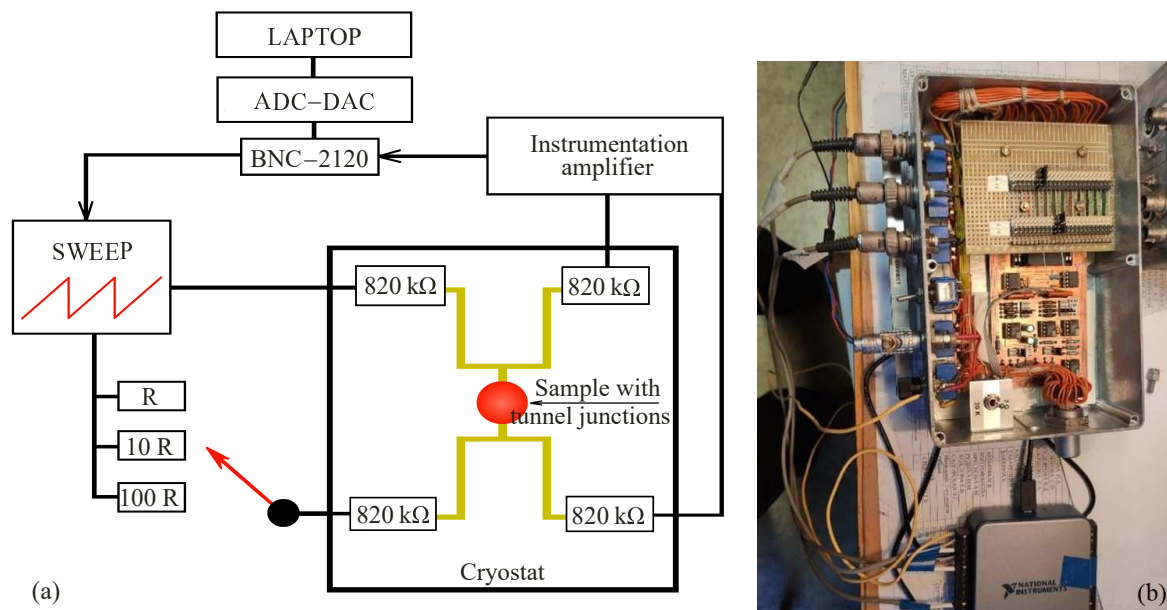


Рис. 5. Считывающая электроника на основе некриогенных усилителей: схематичное изображение принципа измерения (а); фотография считывающего блока на основе инструментальных усилителей (b).

алюминиевого электрода с целью удаления паразитных окислов, затем проводят контролируемое окисление (создается слой изолятора), после которого напыляется слой нормального металла. Схематичное изображение процесса изготовления СИНИС-структуры приведено на рис. 4. На очищенную кремниевую подложку (Si) с контактными электродами (P) наносят двухслойный резист (рис. 4а). Нижний подслой кополимера требуется для создания подтравы, чтобы в процессе удаления резистивной маски напыленная пленка не отрывалась вместе с резистом. Далее напыляется пленка алюминия (сверхпроводящие электроды); через открытые окна в резистивной маске пленка оседает на подложке (рис. 4б). После удаления резистивной маски (рис. 4с) на подложку также наносится двухслойная резистивная маска (рис. 4д) для формирования изолятора и нормального металла. Перед напылением поглотителя (N) предварительно в напылительной камере проводится травление слоя сверхпроводящих электродов для удаления паразитных окислов, которые образуются на их поверхности. Слой изолятора (I) получают окислением алюминия путем напуска кислорода в напылительную камеру. Далее уже напыляется слой поглотителя из нормального металла (N) (рис. 4е). Схематичное изображение изготовленной СИНИС-структуры после удаления резистивной маски приведено на рис. 4ф.

5. СЧИТЫВАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Один из ключевых элементов приемных систем — считывающая электроника, которая, как

и остальные элементы приемной системы, имеет собственные шумы.

В контексте наземных наблюдений теплая считывающая электроника, традиционно используемая для СИНИС-детекторов, вполне удовлетворяет требованиям. Однако для более чувствительных исследований (например, на баллонных и тем более космических обсерваториях) или же для многопиксельных приемных систем требуется снижение шумовых характеристик такой электроники, например переход к системе считывания на основе высокочастотных копланарных резонаторов с холодным усилителем. В данном разделе будут рассмотрены оба варианта: «классическая» для СИНИС-детекторов электроника на основе JFET² и микроволновая система считывания на ниобиевых копланарных резонаторах с холодным НЕМТ³-усилителем.

5.1. Неохлаждаемая считывающая электроника

Теплая считывающая электроника для СИНИС-детекторов выполняется на основе операционных усилителей (JFET или MOSFET⁴), работающих при комнатной температуре. В общих чертах

² Junction field effect transistor — переходный полевой транзистор.

³ High Electron Mobility Transistor — транзистор с высокой подвижностью электронов.

⁴ Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor — полевой транзистор с изолированным затвором.

принцип работы такой системы, схематичное изображение которой приведено на рис. 5, следующий: на исследуемый образец подается постоянный ток и измеряется разность потенциалов на устройстве. Измерения проводятся по четырехпроводной схеме, чтобы исключить влияние сопротивления проводов. Для сбора и обработки информации при проведении лабораторных экспериментов используются специализированные АЦП—ЦАП⁵-платы производства National Instruments, USA. Они же предполагаются для использования в рамках первых тестовых запусков приемника на БТА. Платы тестового комплекта электроники работают под управлением компьютера и специализированного программного обеспечения IRTECON, созданного Ермаковым (Ermakov et al., 2001). Симметричная схема смещения по току реализована при помощи двух сопротивлений 820 кОм, расположенных на разъеме в «холодной» части криостата, последовательно соединенных с СИНИС-структурой. Измеренные шумы такой системы составили 20 нВ Гц^{-0.5}.

Наряду с тестовой версией прорабатывается вариант считывающей электроники на базе микрокомпьютера и отечественного внешнего модуля АЦП/ЦАП LCARD E14-140M-D-m. Альтернативным решением является схема с использованием платы ELBEAR ACE-UNO, построенной на МК32 АМУР (к1948вк018) — первом полностью отечественном микроконтроллере с ядром на открытой архитектуре RISC-V⁶. Разрабатываемая информационная система, тесно интегрированная с системами телескопа, будет обеспечивать не только считывание сигнала с СИНИС-детектора и контроль системы криостатирования, охлаждающей детекторы, но и поддерживать запись и контроль состояния системы наведения, а также режимы сопровождения наблюдаемых объектов и диаграммной модуляции. Протокол обмена данными с удаленным микрокомпьютером строится на основе системы gRPC⁷, которая позволяет: вести двунаправленную потоковую передачу и управлять потоком, осуществлять блокирующие или неблокирующие привязки, а также функции отмены и тайм-ауты. Кроме того, эта система поддерживает множество языков программирования, что обеспечивает гибкость в выборе инструментов для разработки клиентских приложений по сбору и обработке данных.

⁵Аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователь.

⁶Reduced Instruction Set Computer.

⁷Remote Procedure Call — система удаленного вызова процедур (RPC).

Еще одним вариантом системы считывания является использование ПЛИС (FPGA⁸). Данное решение направлено на дальнюю перспективу развития приемной части с расширением до матрицы приемных элементов, так как FPGA является наиболее скоростным решением для обработки информации, в том числе в области машинного зрения, а именно изображений. Наблюдения на телескопах требуют обработки больших объемов данных в режиме реального времени. FPGA идеально подходит для таких задач, благодаря своей способности выполнять параллельные вычисления с высокой скоростью. Это важно для таких операций, как фильтрация сигналов, корреляция данных и использование адаптивной оптики. FPGA может обрабатывать данные с минимальной задержкой, что очень значимо для телескопов, отслеживающих быстрые явления. Одним из главных преимуществ FPGA является возможность ее конфигурации под конкретные задачи. Для телескопов это означает, что архитектура может быть легко адаптирована к новым научным потребностям, изменяющимся алгоритмам обработки данных или к новым типам датчиков. Например, можно настроить FPGA под спектральный анализ, корреляционную обработку радиосигналов или даже обработку изображений в реальном времени.

Для данного проекта в качестве такого дополнительного варианта считывающей системы был выбран комплект Xilinx Kria KR260 Robotics Starter Kit, который по сути является микрокомпьютером на основе процессоров с архитектурой ARM⁹ и FPGA, объединенных в системе на модуле (SoM—System on Module) Zynq UltraScale + MPSoC EV (XCK26). Достоинством таких систем по сравнению с широко распространенными одноплатными микрокомпьютерами Raspberry Pi является возможность создавать логические компоненты для обработки данных (Фурье-процессоры, корреляторы, фильтры FIR/IIR¹⁰) с использованием ресурсов FPGA, которые будут работать в реальном времени и передавать информацию по общей шине данных с процессорными ядрами, а сервисными функциями, такими как управление логическими устройствами FPGA, организация интерфейса Ethernet и т.д., будет заниматься операционная система микрокомпьютера (FreeRTOS или Linux). Комплект Kria KR260 рассматривается на перспективу, когда возникнет необходимость считывания нескольких каналов АЦП и обработки поступающих отсчетов в реальном времени (компрессия,

⁸Field-Programmable Gate Array — программируемая пользователем вентильная матрица (ППВМ, ПЛИС).

⁹Advanced RISC Machine.

¹⁰Finite Impulse Response (FIR) and Infinite Impulse Response (IIR) filters.

фильтрация и т. д.). Рабочий комплект электроники, который будет создан на отечественном оборудовании, будет встроен в аппаратно-программную систему контроля телескопа БТА. Для реализации координированных измерений прорабатывается вопрос использования программных сред разработки и запуска экспериментальных установок с функциями SCADA¹¹ (например, EPICS¹² и т. д.).

5.2. Микроволновая система считывания

Альтернативным вариантом неохлаждаемой считывающей электроники является охлаждаемая микроволновая система считывания на основе высокочастотных сверхпроводящих копланарных резонаторов, размещенных в криостате в непосредственной близости от детекторов (рис. 6). Достоинства такой системы следующие:

- при помощи одного коаксиального кабеля можно считывать сигнал с множества детектирующих матриц (в случае теплой считывающей электроники потребуется большое количество проводов для съема/подачи сигнала, которые также будут вносить собственные шумы и наводки);
- более низкие шумы охлаждаемого до криогенных температур усилителя (также возможна реализация джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны на чипе с исследуемым образцом);
- высокая частота считывания микроволнового диапазона позволяет снизить фликкер-шум по сравнению со считывающей электроникой на JFET-транзисторах, работающих на постоянном токе;
- более компактная конструкция.

Высокочастотный резонатор представляет собой копланарную четвертьволновую линию, выполненную из сверхпроводящего материала. На конце такого резонатора в качестве нагрузки подключается детектор/детектирующая матрица. С другой стороны резонатор емкостной связью подключается к линии питания. К этой линии может быть подключено множество подобных резонаторов, настроенных на различные частоты. Первые исследования по интеграции такого считывания сигнала для СИНИС-детектора приведены в публикациях Tarasov et al. (2020b) и Gunbina et al.

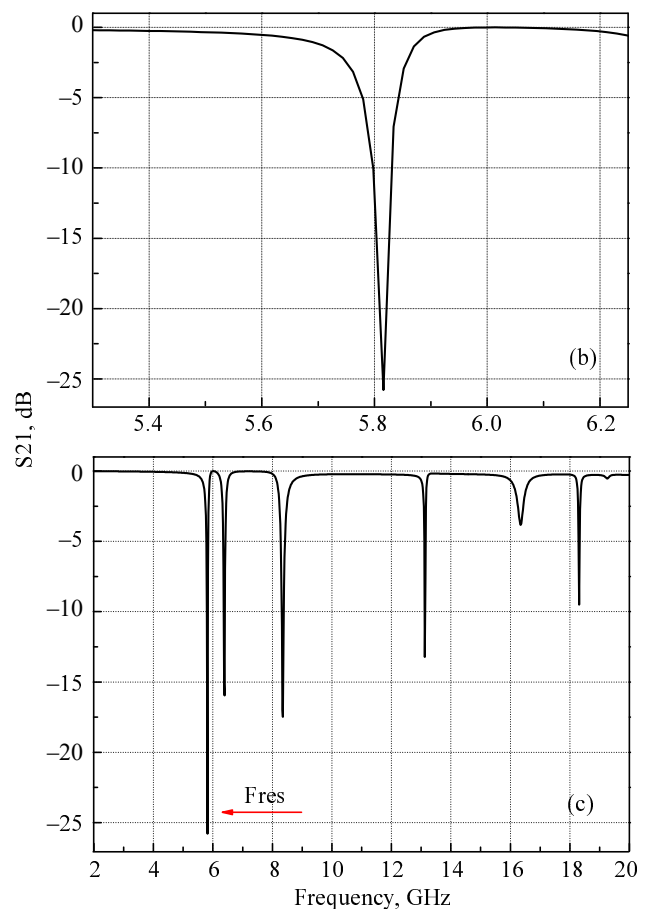
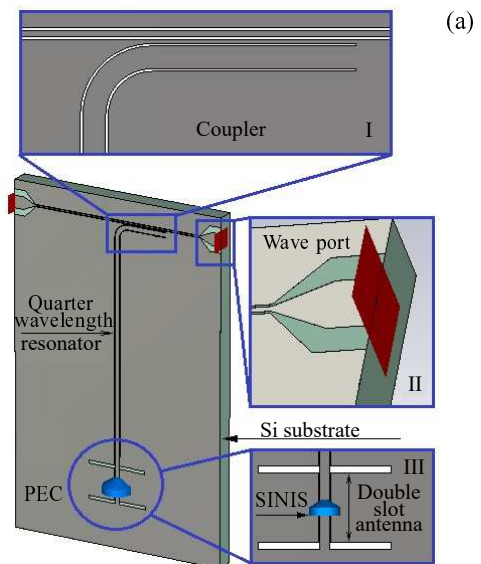


Рис. 6. Схематичное изображение элементов микроволновой системы считывания для СИНИС-детекторов: моделируемая структура на резонансную частоту F_{res} 6 ГГц (а), где I — ответвитель, обеспечивающий емкостную связь между резонатором и линией передачи, II — волновой порт, III — PEC (perfect electric conductor); S21 — параметр такой структуры в узком диапазоне частот (b); S21 — параметр такой структуры в широком диапазоне частот (c).

¹¹Supervisory Control And Data Acquisition — система диспетчерского управления и сбора данных.

¹²Experimental Physics and Industrial Control System — программная среда для разработки и запуска распределенных систем управления для научных и экспериментальных установок, таких как ускорители частиц, телескопы и другие большие установки.

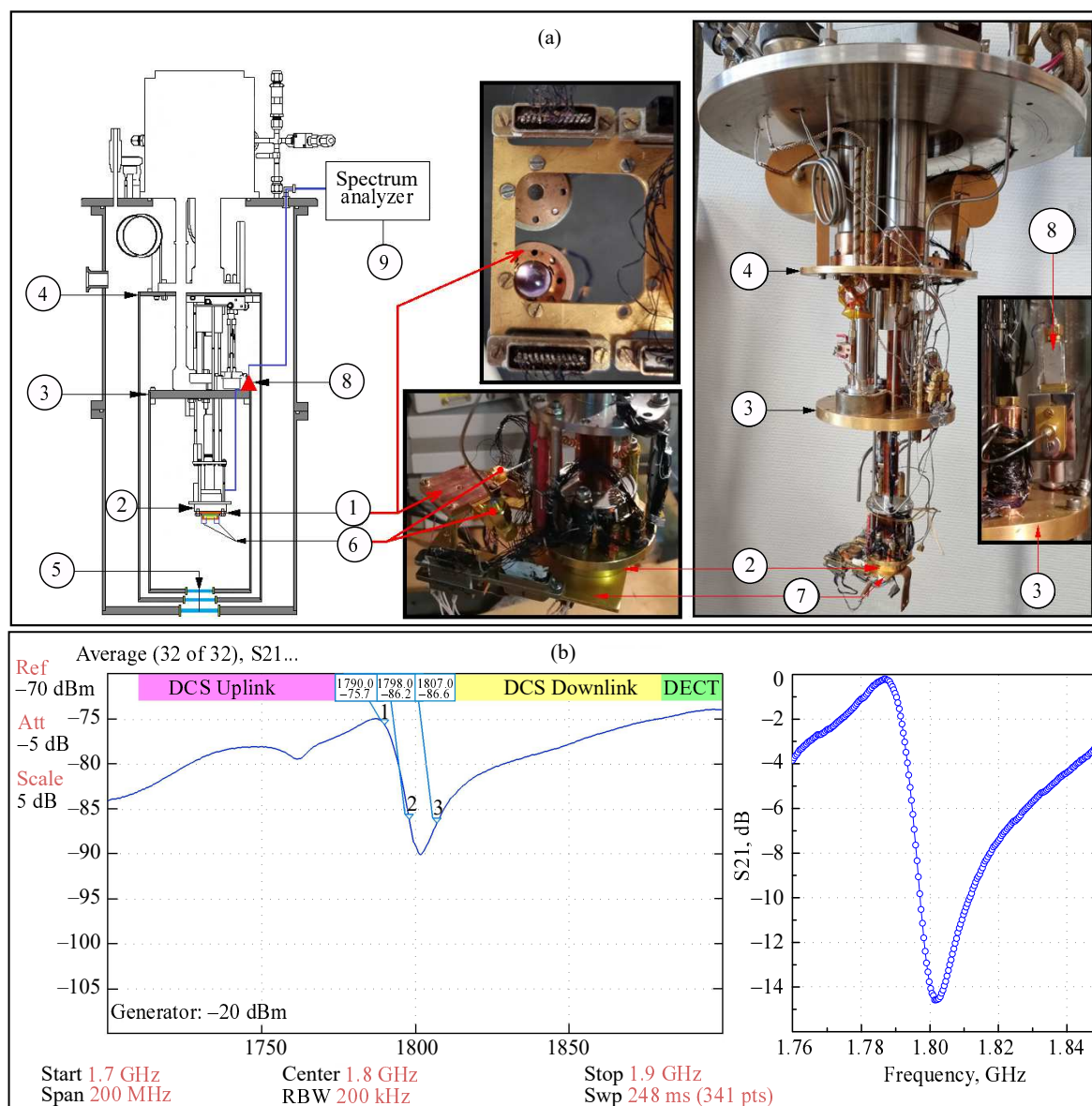


Рис. 7. Экспериментальный стенд (а) и результаты исследования СИНИС-детекторов с микроволновой системой считывания (б). На панели (а): 1 — исследуемый образец в специализированном держателе; 2 — холодная плита криостата с минимально достижимой температурой 276 мК; 3 — вторая ступень криостата с температурой 2 К (PTC 2nd stage); 4 — первая ступень криостата с температурой 55 К (PTC 1st stage); 5 — окна в экранах криостата; 6 — коаксиальный кабель, который через SMA-разъем и контактные иглы подключается к контактным площадкам на образце с копланарными резонаторами; 7 — выносная планка, прикрепленная к холодной плите криостата, на которую монтируются исследуемые образцы; 8 — NEMT-усилитель с шумовой температурой 5 К (возможно использование и менее шумящих усилителей, например производства фирмы Low Noise Factory (<https://lownoiseactory.com/product-category/cryogenic-amplifier/>)), установленный на плите с температурой 2 К; 9 — анализатор спектра. Панель (б): измеренный резонансный отклик (без облучения внешним источником) исследуемого образца с копланарным резонатором, рассчитанным на частоту 2 ГГц при рабочей температуре 0.3 К.

(2021а). Была доработана система криостатирования путем ввода криогенного (теплоизолирующего) коаксиального кабеля, и разработан специализированный держатель образцов. Экспериментальная установка и полученный резонансный отклик показаны на рис. 7.

6. СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ Nb—AlO_x—Al

Параметры Al—AlO_x—Pd—AlO_x—Al СИНИС-структур при температурах 300 мК и ниже зачастую являются избыточными по значениям отклика и МЭШ при реальных наземных наблюдениях (на телескопе через атмосферу). В этом случае можно применить структуры Nb—AlO_x—Pd—AlO_x—Nb

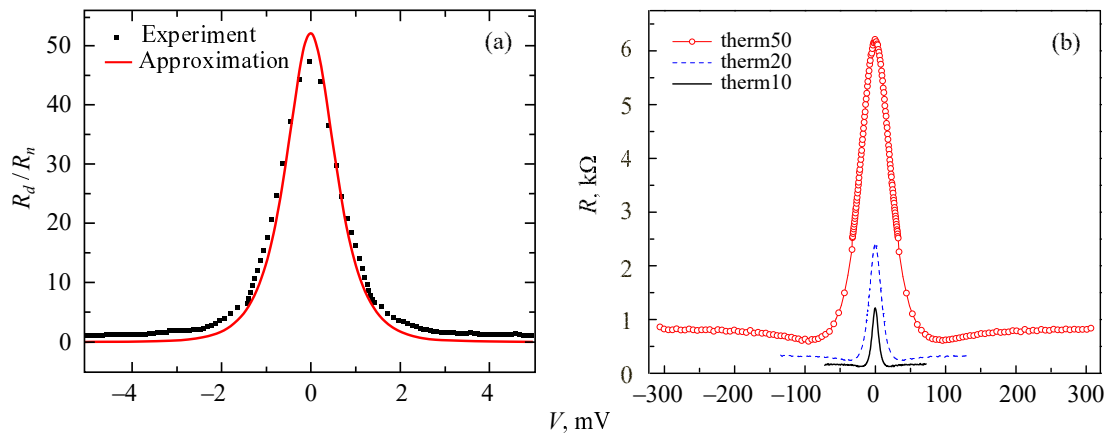


Рис. 8. Дифференциальное сопротивление двух СИН-переходов (а) и цепочек из 10, 20 и 50 СИН-переходов (б).

также СИНИС-типа, но работающие при температуре жидкого гелия. На рис. 8 приведены дифференциальные сопротивления для цепочек из 2, 10, 20, 50 СИН-переходов при температуре 2.8 К, получаемой на второй ступени криостата с микрокриогенной системой (МКС) замкнутого цикла Гиффорда–МакМагона (GM — Gifford MacMagon) (Markina et al., 2024). Для таких детекторов возможно применение как GM-криостатов, так и криостатов на пульсационных трубках (PT — Pulse tube). В случае применения МКС замкнутого цикла обеспечивается непрерывность работы приемника и нет необходимости применять жидкий гелий и азот. Однако при работе на телескопе БТА может оказаться желательным снижение вибраций и наводок от компрессора МКС. Для этого можно предусмотреть режим с реконденсацией гелия, когда в светлое время суток, непригодное для астрономических наблюдений на БТА в оптическом диапазоне, производится конденсация газообразного гелия из газгольдера, а в ночное, наблюдательное, время компрессор выключается и проводятся наиболее чувствительные измерения. Такой режим, обеспечивающий рабочий уровень криотемператур в течение восьми часов, был описан в работе Edelman and Yakorov (2013).

Крутизна отклика по току при переходе от сверхпроводящего алюминия к сверхпроводящему ниобию изменяется как $1400/140 = 10$ раз, то есть от 5×10^3 до 5×10^2 А Вт⁻¹. Для сравнения, величина ампер-ваттной чувствительности МДМДМ детектора составляет от 4×10^4 при 0.28 К до 2.9×10^3 при 4 К.

Дальнейшим развитием такого подхода к разработке детекторов становится применение структур типа «металл–изолятор–металл–изолятор–металл», в которых средний металл представляет собой подвешенный над подложкой микроволновый абсорбер. Крутизна отклика рассматриваемых

ниже МДМДМ-структур составляет от 4×10^4 при 0.28 К до 2.9×10^3 при 4 К.

7. МДМДМ-ДЕТЕКТОРЫ

Принцип действия МДМДМ-детекторов мало отличается от классического металлического болометра Лэнгли, изобретенного еще в 1878 году. Однако применение тепловой развязки от подложки и туннельных переходов для считывания и снижения электронной теплопроводности позволяет рассчитывать на приемлемую чувствительность, сравнимую с охлаждаемыми диодами Шоттки (см. таблицу 1), при возможности работать в широком диапазоне температур.

Для умеренного напряжения смещения отклик по току классического болометра теоретически может достигать $S_I = dI/dP = 1/V$ при снижении смещения вплоть до $V = kT/e$, что соответствует предельному болометрическому отклику $S_I = dI/dP = e/kT$. Умножая на сопротивление структуры, получаем отклик по напряжению $S_V = dV/dP = eR/kT$. Увеличением нормального сопротивления туннельных переходов в идеале можно достичь высокого отклика по напряжению МДМДМ в режиме квантового отклика с мультипликацией числа возбужденных электронов (Devyatov et al., 2006). Для квантового механизма поглощения излучения без достаточной термализации отклик может оказаться меньше и соответствовать случаю фотонного счетчика, когда токовый отклик снижается до одного электрона на квант: $S_I = e/hf = 900$, в то время как при термализации $S_I = e/kT = 4 \times 10^4$ (для 300 ГГц и 0.3 К).

Оценки предельных параметров для квантовых детекторов МДМДМ при температурах 0.28 К, 4.2 К, 77 К и 300 К приведены в таблице 3.

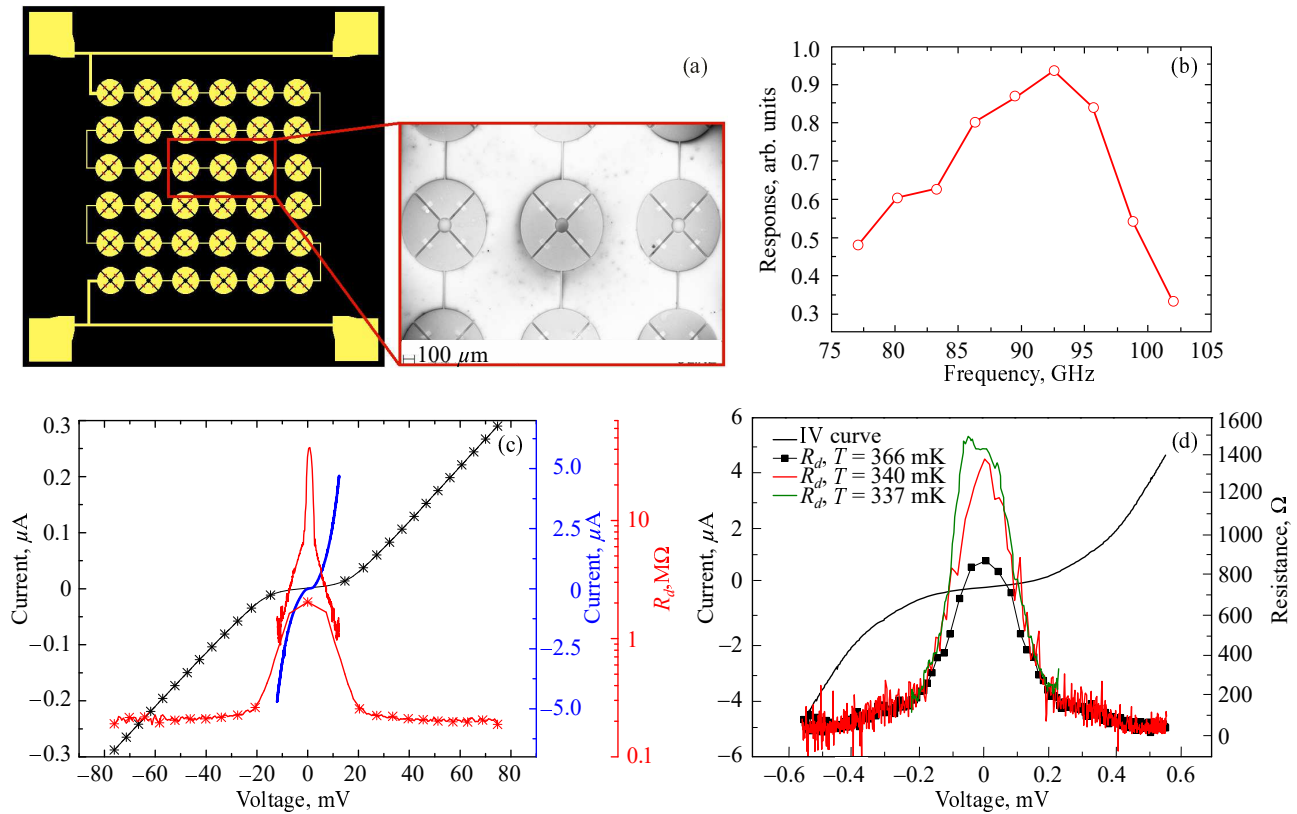


Рис. 9. Матрица диапазона 90 ГГц: топология и фотография со сканирующего электронного микроскопа фрагмента матрицы (a); измеренный спектральный отклик матрицы (b); измеренные ВАХ и R_d матрицы с последовательным соединением элементов (Tarasov et al., 2024) (c); измеренные ВАХ и R_d при различных температурах матрицы с параллельным соединением элементов (d).

Таблица 3. Оценки предельных параметров для квантовых детекторов МДМДМ при различных температурах (Tarasov et al., 2020a)

T , К	S , A Вт ⁻¹	МЭШ, Вт Гц ^{-1/2}
0.28	4.3×10^4	2.8×10^{-17}
4.2	2.9×10^3	1.6×10^{-16}
77	160	1.25×10^{-15}
300	40	10^{-14}

8. КОНСТРУКЦИЯ ПИКСЕЛЯ ДЛЯ ПРИЕМНИКА ДИАПАЗОНА 90 ГГц

Детектирующая матрица на основе планарных кольцевых антенн с интегрированными СИНИС-детекторами (см. рис. 9a) представляет собой последовательное соединение 36 планарных кольцевых антенн. Для обеспечения контакта с матрицей на чипе расположено четыре контактных площадки, которые позволяют реализовать четырехпроводную схему измерения для исключения «паразитного» сопротивления, набегающего на проводах.

Спектральный отклик такой структуры (Balega

et al., 2024), изображенный на рис. 9b, был измерен по методике с тремя опорными каналами для получения более «чистой» амплитудно-частотной характеристики. Подробно методика измерений подобных приемных матриц описана в Gunbina et al. (2020). Результаты численного моделирования такой структуры для случаев облучения матрицы со стороны подложки и стороны антенн приведены также в публикации Balega et al. (2024). Дополнительно мы изготовили аналогичную матрицу, но с параллельным соединением элементов (низкоомная структура), для которой измеренные вольт-амперная характеристика (ВАХ) и динамическое сопротивление R_d при различных температурах приведены на рис. 9d.

9. СИСТЕМА КРИОСТАТИРОВАНИЯ

Основная концепция криосистемы представляет собой конструкцию на основе криостата с МКС замкнутого цикла на пульсационной трубе гелиевого уровня температуры (2.5–4 К) и вставки сорбционного охладителя на Гелий-3 Heliox AC-V производства Oxford Instruments (рис. 10a), обеспечивающей дальнейшее охлаждение до субкельвин-

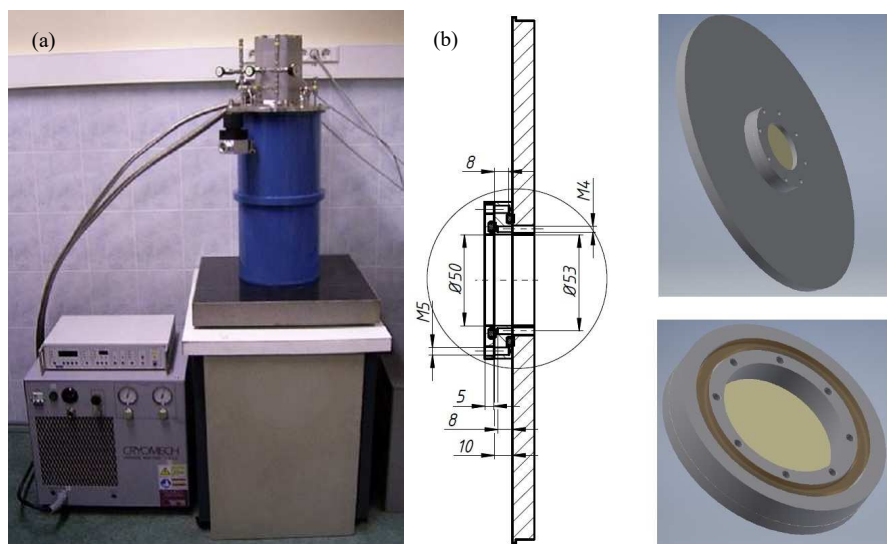


Рис. 10. Криосистема: фотография криосистемы (а); чертеж конструкции окна и 3D-модель (б). Размеры даны в миллиметрах. $M4$ и $M5$ — стандарты резьбовых отверстий.

ного уровня температур, требуемое для СИНИС-детекторов. Лабораторный криостат Heliox модернизирован для работы на телескопе, в частности разработана конструкция квазиоптического вакуумного окна в днище криостата (рис. 10b) и выполнен монтаж этого окна в криостат. Был выбран вариант с креплением на глухой резьбе. Также предполагается конструкция сменных окон для обеспечения возможности использования различных фильтров (диапазон, материалы и т.д.) на двух радиационных экранах на температурных ступенях 100 К и 2.8 К. На данный момент такая система криостатирования полностью дооборудована требуемыми интерфейсами и готова к монтажу в кабине Несмита телескопа БТА.

Наряду с вариантом системы криостатирования проработаны альтернативы, в частности конструкция также на базе МКС замкнутого цикла в качестве установки прекулинга, содержащей описанную выше (раздел 6) систему реконденсации (Edelman and Yakorov, 2013) и оживительный контур, позволяющий обеспечить длительное поддержание рабочих температур при выключенном компрессоре МКС.

Наконец, имеется запасной вариант системы охлаждения без МКС, в котором нет механических движущихся частей, но необходима периодическая заправка криоагентом — жидким гелием (Edelman, 2009).

Представленные выше две последние системы криостатирования полностью функциональны (ссылки даны в тексте), но требуют дооснащения оптическим окном.

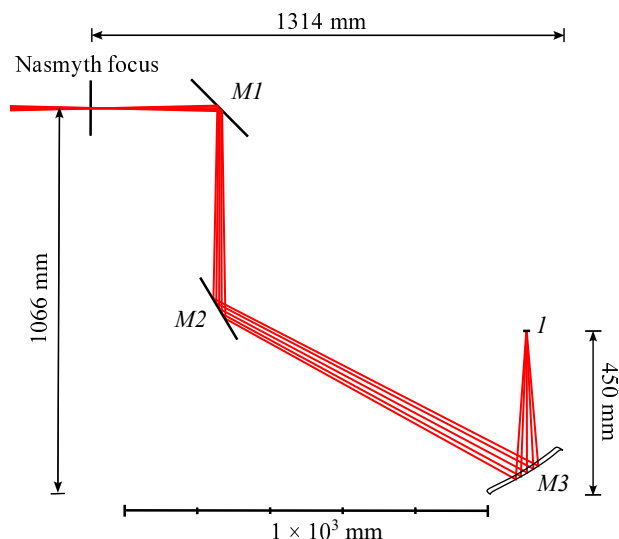


Рис. 11. Оптическая схема согласующей оптики с двумя плоскими зеркалами: $M1$ и $M2$; $M3$ — внеосевой параболид; I — точка совмещения сфокусированного приходящего излучения с фазовым центром рупорной антенны.

10. КОРРЕКТИРУЮЩАЯ ОПТИКА

Разработана конструкция оптических и механических интерфейсов, обеспечивающих встраивание субТГц-приемника в фокус Несмита оптического телескопа БТА. Ключевым элементом оптического интерфейса является корректирующая оптика. Первоначально рассматривалась схема с одним наклонным плоским зеркалом, осуществляющим сканирование по полю, однако вследствие конструктивных особенностей его диаметр получался равным 700 мм. Для его уменьшения предложена схема с двумя плоскими зеркалами меньших

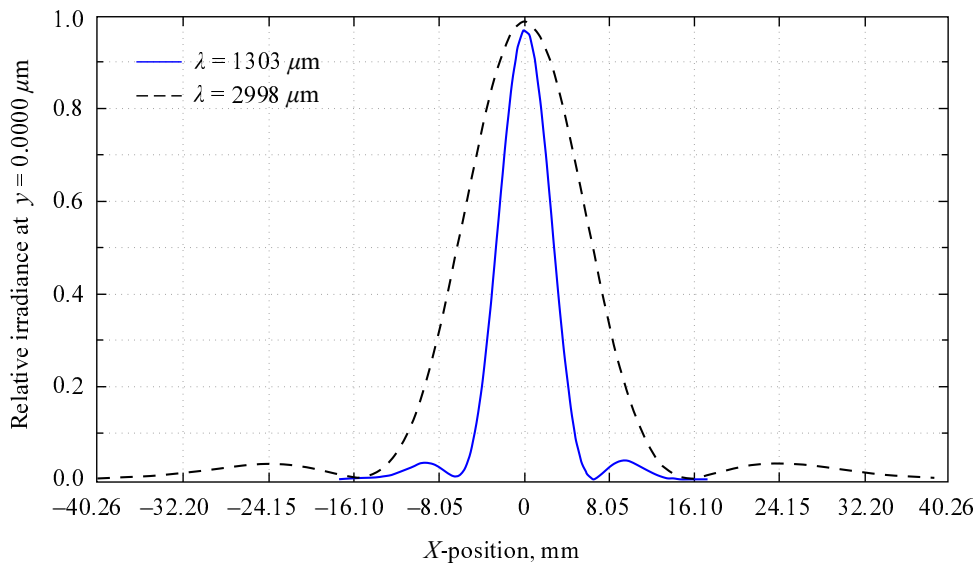


Рис. 12. Размеры дифракционного пятна рассеяния для $\lambda = 1303$ мкм (230 ГГц) и $\lambda = 2998$ мкм (100 ГГц).

диаметров (рис. 11). В данной схеме свет от ГЗ телескопа падает на первое плоское зеркало ($M1$), под наклоном в 45° (диаметр зеркала 200 мм), затем на второе плоское зеркало ($M2$), расположенное под углом 59° к оптической оси (диаметр зеркала 200 мм), после чего падает на внеосевой параболоид $M3$ (диаметром 200 мм), плоскость изображения которого совпадает с входным окном криостата. Радиус внеосевого параболоида $r = 500$ мм, $f' = 250$ мм. Относительное отверстие в плоскости изображения 1:8.3, числовая апертура 0.12. Соответственно, размер ДН после данной системы составит $13^\circ 8'$. Диаметр дифракционного пятна рассеяния на длине волны 1303 мкм (0.23 ТГц) равен 13 мм, а на длине волны 2998 мкм (0.1 ТГц) — 30 мм (рис. 12). Будет осуществляться сканирование только изображения, получаемого в фокусе Несмита. Для это достаточно качать всего лишь одно зеркало (было выбрано зеркало $M2$, рис. 11). Масса такого зеркала около 1 кг, поэтому в данном случае легче реализовать наклон этого зеркала толкателем на основе эксцентрика (изначально рассматривался вариант с пьезоактуатором). Для осуществления сканирования по полю возможно разработать механизм синхронного качания плоских зеркал при помощи механических толкателей на основе кулачкового механизма, что при данных габаритах не представляет сложную задачу. Такой вариант сканирования рассматривается на перспективу для дальнейших исследований, его реализация не является трудоемкой, а авторы имеют опыт создания подобных систем.

К достоинствам предложенной системы относятся меньшие габариты ее элементов, возможность реализации оптического канала подсмотра (дополнительное откидное плоское зеркало и

линзовый компенсатор после параболоида). Недостатками являются дополнительное отражение от плоского зеркала, ведущее к потере пропускания, и большие диаметры дифракционного пятна.

Качание зеркала $M2$ обеспечит диаграммную модуляцию — отклонение «входа приемника» на ширину не менее ДН от наблюдаемого объекта (то есть будет осуществляться «подключение» входа приемника попеременно то к антенне, то к эквиваленту — соседнему участку неба.) Выделение сигнала будет производиться в режиме цифрового синхронного детектора с опорным сигналом модуляции от блока управления толкателем в стандартной вкладке пакета IRTECON. Частота модуляции может быть выбрана достаточно высокой, в диапазоне 250–350 Гц, что позволит избавиться как от сетевых наводок на частоте 50 Гц, так и от множества гармоник частоты переключения блока клапанов импульсной трубы, которые присутствуют на частотах от 1 до 30 Гц.

11. ОБЩИЙ ВИД СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ НА ТЕЛЕСКОПЕ БТА В СУБТГц-ДИАПАЗОНЕ

Общий вид системы наблюдений на телескопе БТА в субТГц-диапазоне приведен на рис. 13. Сигнал, собираемый зеркалом телескопа, направляется в окно криостата. В схему добавлены специализированные квазиоптические элементы, необходимые для обужения диаметра пучка приходящего излучения и его направления в окно криостата (подробности приведены в разделе 10). Внутри криостата на холодной плите (рабочая температура 0.28–0.3 К) крепится детектирующая ячейка в специализированном держателе образцов с

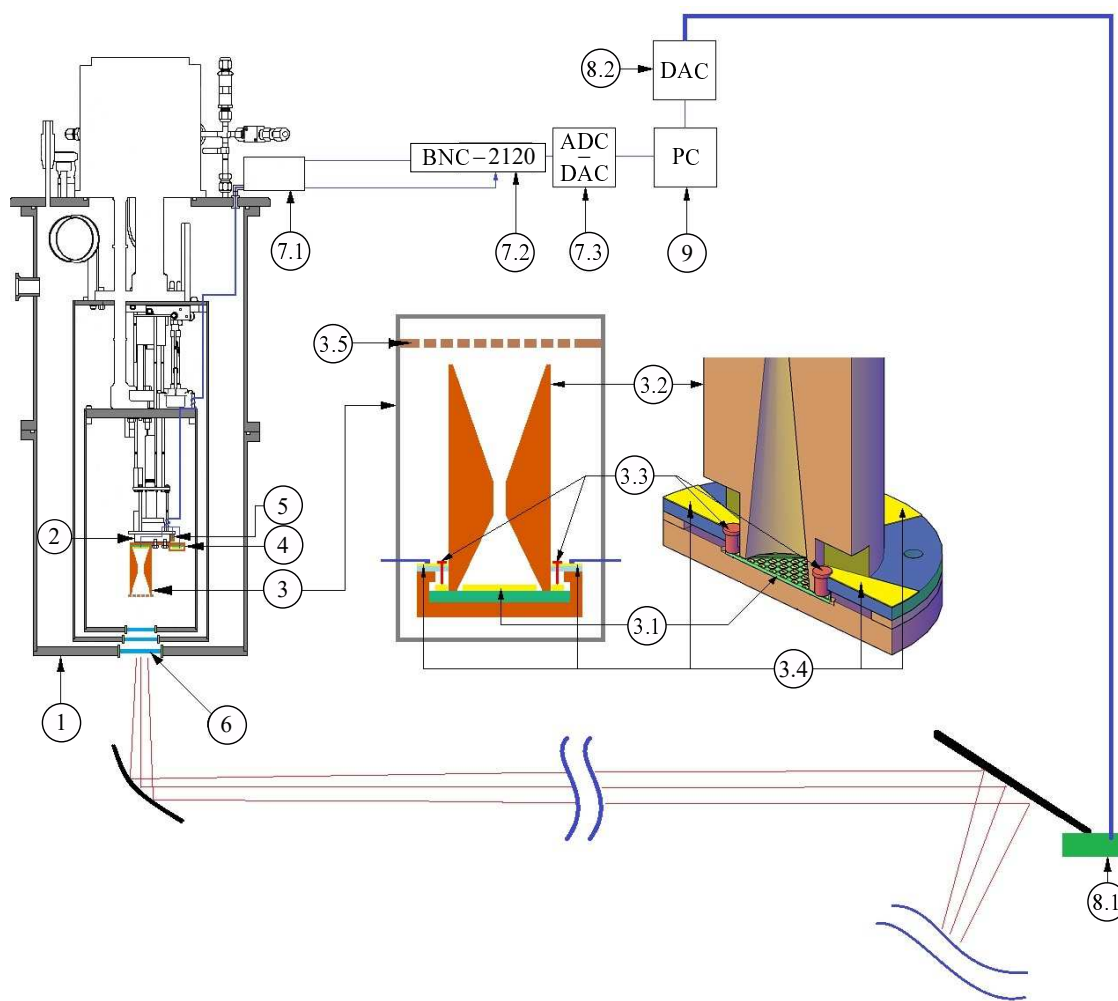


Рис. 13. Общий вид системы наблюдений: 1 — криостат; 2 — холодная плита криостата (рабочая температура — 0.3 K); 3 — детектирующая ячейка: 3.1 — приемная матрица с интегрированными СИНИС-детекторами; 3.2 — часть держателя образца с рупорной конструкцией; 3.3 — прижимные контакты rого-pin для осуществления контакта с контактными площадками на приемной матрице; 3.4 — контактные площадки на стеклотекстолитовой проставке, в которую впаиваются rого-pin; 3.5 — фильтр; 4 — «темновой» образец, (идентичная приемная матрица, но в полностью закрытом медном держателе, так называемый референсный образец); 5 — термометр на холодной плите криостата; 6 — вакуумные окна с фильтрами в днище криостата для завода приходящего сигнала к детектирующей матрице; 7 — элементы считывающей/управляющей электроники: 7.1 — считывающий блок на основе инструментальных усилителей; 7.2 — коммутационная плата BNC-2120; 7.3 — аналогово-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи производства National Instruments; 8 — элементы диаграммного модулятора: 8.1 — электромеханический толкатель с эксцентриком для обеспечения наклона зеркала; 8.2 — цифро-аналоговый преобразователь для управления пьезоприводом; 9 — управляющий компьютер со специализированным программным обеспечением (IRTECON) для осуществления подачи/съема сигнала с детектирующего устройства.

рупорной конструкцией (back-to-back horn), используемой для согласования сигнала, заводимого в криостат, с детектирующей матрицей. Дополнительно на холодной плите будет устанавливаться «темновой» (референсный) образец — идентичная детектирующая матрица, но в полностью закрытом от внешнего излучения держателе. Аналогичная схема экспериментальных исследований в лабораторных условиях, в которой в непосредственной близости от образца на холодной плите располагался рутениевый резистор как один из опорных

каналов экспериментальной установки, использована в работе Gunbina et al. (2020). В нашем случае вместо рутениевого резистора будет установлен темновой образец. Основная и темновая матрицы изготавливаются по надежной технологии, в одном технологическом цикле и на одной подложке. В данных условиях разброс параметров матриц будет минимален и не внесет искажения в исследования.

Для осуществления контакта с детектирующей матрицей используются прижимные контакты (rogo-pin), которые заводятся к контактными пло-

щадкам матрицы через специальные отверстия в держателе, а сами rogo-rip впаяваются в стеклотекстолитовую проставку, надеваемую на держатель. Как показала практика, многократное термоциклирование не влияет на состояние таких держателей образцов с впаянными rogo-rip и возможно их многократное использование. Провода выводятся из криостата на разъем, к которому подключается считывающая электроника. В данном случае в условиях наземных наблюдений и одиночного пикселя будет использована «классическая» для СИНИС-детекторов считывающая электроника — на основе JFET-транзисторов (подробно рассмотрена в разделе 5.1). Диаграммная модуляция будет осуществляться путем качания второго зеркала при помощи электромеханического толкателя с эксцентриком на частоты порядка 10 Гц. Считывание/подача сигнала и управление пьезоприводом осуществляются при помощи специализированного программного обеспечения (IRTECON) с компьютера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной публикации представлен полный объем работ по созданию и встраиванию в состав инструментального комплекса оптического телескопа БТА радиометра субТГц-диапазона частот на основе СИНИС-детекторов. Мы изготовили партию матриц антенн диапазона 90 ГГц с СИНИС-детекторами для работы при температурах 100–300 мК, $M\dot{E}Ш = 10^{-17}$ Вт Гц $^{-1/2}$ и провели их лабораторные испытания. Были разработаны и изготовлены СИНИС-структуры с подвешенными над подложкой абсорберами для достижения предельных параметров отклика. Мы исследовали СИНИС-детекторы на основе структуры $Al-AlO_x-Nb$ туннельных переходов для работы при температурах до 2–8 К с ожидаемой оптической $M\dot{E}Ш = 10^{-14}$ Вт Гц $^{-1/2}$. Были исследованы также МДМДМ-структуры для работы в широком диапазоне температур, вплоть до комнатных, с ожидаемой $M\dot{E}Ш = 10^{-12}$ Вт Гц $^{-1/2}$. Изготовлена линейка планарных квазиоптических полосно-пропускающих фильтров, в том числе на 90 ГГц, и объемных высокоэффективных ФВЧ (фильтров высокой частоты) (Tarasov et al., 2024).

В результате создан и представлен первый отечественный образец сверхпроводникового субТГц-приемника, предназначенного для работы в составе астрономической обсерватории. Он включает полный объем необходимых компонентов и вспомогательных систем для астрономических наблюдений. В частности, это проверенные на практике системы считывающей электроники, криовакуумные системы глубокого охлаждения сверхпроводниковых

приемников, а также разработанный оптический дизайн с комплексом механических, оптических и криогенных интерфейсов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны организациям, в распоряжении которых находятся уникальные объекты инфраструктуры УНУ «Криоинтеграл» (№ 352529), УНУ «ЦКП-7» (№ 3589084) и УНУ «БТА» (№ 73609), за предоставление доступа к оборудованию при проведении исследований. Изготовление образцов исследуемых приемных структур СИНИС-детекторов выполнено на оборудовании УНУ «Криоинтеграл». Разработка и реализация различных электрических и механических интерфейсов для проведения исследования приемных структур, а также работы по криовакуумному оснащению выполнены на базе УНУ «ЦКП-7». Разработка оптической схемы и подготовка площадки для выполнения тестовых наблюдений осуществляются на научном оборудовании УНУ БТА.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования основной концепции (СИНИС-детекторы, считывающая электроника, система криостатирования и корректирующая оптика) выполнены при финансовой поддержке гранта № 23-62-10013 РФФИ (<https://rscf.ru/project/23-62-10013/>).

Разработка структур $Nb-AlO_x-Al$ и МДМДМ-детекторов выполнена за счет проекта № 075-15-2024-482 Министерства науки и высшего образования РФ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Ariyoshi, T. Taino, A. Dobroiu, et al., *Applied Physics Letters* **95** (19), id. 193504 (2009). DOI:10.1063/1.3263711
2. S. Ariyoshi, K. Takahashi, T. Noguchi, et al., *Superconductor Science and Technology* **25** (7), article id. 075011 (2012). DOI:10.1088/0953-2048/25/7/075011
3. J. W. M. Baars, *The Paraboloidal Reflector Antenna in Radio Astronomy and Communication* (Springer, Berlin, 2007). DOI:10.1007/978-0-387-69734-5
4. Y. Balega, G. Bubnov, A. Chekushkin, et al., *Sensors* **24** (2), id. 359 (2024). DOI:10.3390/s24020359

5. J. Bueno, V. Murugesan, K. Karatsu, et al., *Journal of Low Temperature Physics* **193**, 96 (2018). DOI:10.1007/s10909-018-1962-8
6. Y. Chai, S. Shu, Y. Li, et al., *Journal of Low Temperature Physics* **214** (3), 210 (2024). DOI:10.1007/s10909-023-03040-7
7. I. A. Devyatov, P. A. Krutitskiĭ, and M. Yu. Kupriyanov, *JETP Letters* **84**, 57 (2006). DOI:10.1134/S0021364006140037
8. J. Du, K. Smart, L. Li, et al., *Superconductor Science and Technology* **28** (8), article id. 084001 (2015). DOI:10.1088/0953-2048/28/8/084001
9. V. Edelman, *Instruments and Experimental Techniques* **52**, 301 (2009). DOI:10.1134/S002044120902033X
10. V. Edelman and G. Yakopov, *Instruments and Experimental Techniques* **56**, 613 (2013). DOI:10.1134/S002044121305014X
11. A. B. Ermakov, S. V. Shitov, A. M. Baryshev, et al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **11** (1), 840 (2001). DOI:10.1109/77.919475
12. A. Generalov, J. Holstein, A. Murros, et al., *ACS Applied Electronic Materials* **6** (4), 2197 (2024). DOI:10.1021/acsaelm.3c01511
13. M. J. E. Golay, *Review of Scientific Instruments* **18** (5), 347 (1947). DOI:10.1063/1.1740948
14. A. Gunbina, S. Mahashabde, M. Tarasov, et al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **31** (5), id. 3068999 (2021a). DOI:10.1109/TASC.2021.3068999
15. A. Gunbina, M. Tarasov, M. Fominsky, et al., “*Fabrication of Aluminium Nanostructures for Microwave Detectors Based on Tunnel Junctions*” in *Advances in Microelectronics Reviews, Vol. 3*, Ed. by S. Y. Yurish (IFSA Publishing, Barcelona, Spain) **3**, 183–211 (2021b).
16. A. A. Gunbina, M. A. Tarasov, S. A. Lemzyakov, et al., *Physics of the Solid State* **62**, 1604 (2020). DOI:10.1134/S1063783420090097
17. J. Henning, P. Ade, K. Aird, et al., *SPIE Conf. Proc.* **8452**, article id. 84523A (SPIE, 2012). DOI:10.1117/12.927172
18. B. S. Karasik and R. Cantor, *Applied Physics Letters* **98** (19), id. 193503 (2011). DOI:10.1063/1.3589367
19. M. A. Markina, A. M. Chekushkin, M. A. Tarasov, et al., *Technical Physics* **69** (7), 1004 (2024).
20. A. V. Merenkov, T. M. Kim, V. I. Chichkov et al. **64** (10), 1387 (2022). DOI:10.21883/FTT.2022.10.53081.50HH
21. O. V. Minin, J. Calvo-Gallego, Y. M. Meziani, and I. V. Minin, *Applied Sciences* **11** (15), id. 7011 (2021). DOI:10.3390/app11157011
22. R. Müller, B. Gutschwager, J. Hollandt, et al., *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **36**, 654 (2015). DOI:10.1007/s10762-015-0163-7
23. C. Nunez, J. W. Appel, S. M. Bruno, et al., *SPIE Conf. Proc.* **12190**, id. 121901J (2022). DOI:10.1117/12.2630081
24. A. G. Paulish, A. V. Gusachenko, A. O. Morozov, et al., *Sensor Review* **40** (3), 291 (2020). DOI:10.1108/SR-03-2020-0047
25. A. Prikhodko, I. Belikov, D. Mikhailov, et al., *Journal of Physics: Conf. Ser.* **2086**, id. 012063 (2021). DOI:10.1088/1742-6596/2086/1/012063
26. A. Rogalski, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **43** (9), 709 (2022). DOI:10.1007/s10762-022-00882-2
27. J. Sayre, P. Ade, K. Aird, et al., *SPIE Conf. Proc.* **8452**, article id. 845239 (2012). DOI:10.1117/12.927035
28. D. Schmidt, K. Lehnert, A. Clark, et al., *Applied Physics Letters* **86** (5), id. 053505 (2005). DOI:10.1063/1.1855411
29. V. Stolyarov, Y. Balega, M. Mingaliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **79** (2), 321 (2024). DOI:10.1134/S1990341324600467
30. M. Tarasov, A. Gunbina, A. Chekushkin, et al., *Applied Sciences* **12** (20), id. 10525 (2022). DOI:10.3390/app122010525
31. M. Tarasov, A. Gunbina, A. Krasilnikov, et al., in *2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation, 2024* (IEEE, 2024), pp. 176–179. DOI:10.1109/RMC62880.2024.10845907
32. M. Tarasov, A. Gunbina, M. Fominskii, and A. Chekushkin, Application for a Russian patent for an invention RU **2757762** (2021a). [in Russian]
33. M. Tarasov, Yu. Nagirnaya, Yu. Gunbina, et al., Application for a Russian patent for an invention RU **2749575** (2021b). [in Russian]
34. M. A. Tarasov, V. S. Edelman, S. A. Lemzyakov, et al., in *2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation, 2020*, (IEEE, 2020a), pp. 25–27. DOI:10.1109/RMC50626.2020.9312267
35. M. A. Tarasov, S. Mahashabde, A. A. Gunbina, et al., *Physics of the Solid State* **62**, 1580 (2020b). DOI:10.1134/S1063783420090292
36. A. Vystavkin, S. Shitov, S. Bankov, et al., *Radiophysics and Quantum Electronics* **50**, 852 (2007).
37. R. Yadav, F. Ludwig, F. R. Faridi, et al., *Sensors* **23** (7), 3469 (2023).
38. G. Yakopov, M. Tarasov, A. Gunbina, et al., in *EPJ Web of Conferences*, vol. 195, id. 05014 (EDP Sciences, 2018). DOI:10.1051/epjconf/201819505014
39. S. Yates, J. Baselmans, A. Endo, et al., *Applied Physics Letters* **99** (7) id. 073505 (2011). DOI:10.1063/1.3624846
40. R. Zhou and J. T. Yeow, *IEEE Nanotechnology Magazine* (online at <https://inm.ieee-nano.org/2024-october-issue-nanotechnology-progress-results/>) (2024). DOI:10.1109/MNANO.2024.3436328

SINIS Detectors in the Subterahertz Range as a Basis for a Receiver for Radio Astronomical Research with the BTA Optical Telescope (SAO RAS)

M. A. Tarasov¹, A. A. Gunbina¹, A. M. Chekushkin¹, M. A. Markina¹, R. A. Yusupov¹, M. Yu. Fominskii¹,
L. V. Filippenko¹, V. S. Edelman², V. F. Vdovin^{3,4}, V. A. Stolyarov⁴, I. I. Zinchenko³, A. M. Krasilnikov^{3,4},
A. S. Marukhno^{3,4}, M. A. Mansfeld^{3,4}, D. E. Kukushkin^{4,5}, D. A. Sazonenko⁴, O. S. Bolshakov³, A. B. Ermakov¹,
I. V. Lesnov³, A. F. Valeev⁴

¹Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125009 Russia

²P. L. Kapitza Institute for Physical Problems Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia

³A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhnii Novgorod, 603950 Russia

⁴Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia ⁵ITMO University, Saint Petersburg, 197101 Russia

There is an ongoing need in ground-based astronomy for ultra-sensitive receivers, both coherent (e.g., superheterodyne) and incoherent types, the latter offering potentially higher sensitivity. Both types rely on superconducting or cryogenically cooled semiconductor materials. This study explores the feasibility of using SINIS-based (Superconductor–Insulator–Normal metal–Insulator–Superconductor) detectors as incoherent superconducting receivers. We evaluate the ultimate performance parameters of SINIS detectors depending on the choice of superconducting material, operating temperature, and detection regime. Under moderate sub-Kelvin cooling (down to 0.28 K), aluminum-based SINIS detectors may achieve a responsivity of up to 10^8 V W^{-1} and a noise-equivalent power $\text{NEP} = 10^{-17} \text{ W Hz}^{-1/2}$. For niobium-based SINIS detectors operating at 4.2 K, our estimates yield an $\text{NEP} = 1.6 \times 10^{-16} \text{ W Hz}^{-1/2}$, which may be of practical interest for specific applications. At the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS), a prototype project is underway to develop a domestic subterahertz observatory module integrated with the Big Telescope Alt-azimuthal (BTA). Within this framework, a SINIS-based subterahertz receiver is planned to be installed at the Nasmyth focus of the BTA optical telescope. This paper provides a technical overview and proposed design of the SINIS receiver, taking into account the optical telescope's reflective system architecture, its immediate environment, and the expected scientific goals of such an observational setup.

Keywords: *instrumentation: adaptive optics—submillimeter astronomy—telescopes*