

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.111.02,
созданного на базе **Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук,** по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

аттестационное дело N _____
решение диссертационного совета от 8 июля 2022 г., № 10

О присуждении Чекушкину Артему Михайловичу, гражданину России ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация на тему **«Матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами и матрицы криогенных фильтров»** принята к защите 6 мая 2022, протокол № 6, диссертационным советом 24.1.111.02, созданным на базе **Федерального государственного бюджетного учреждения науки Российской академии наук (125009, Москва, ул. Моховая, Д.11. корп.7)** (приказ Рособнадзора о создании совета № 2397–1958 от 21.12.2007 г.; приказ Минобрнауки РФ о продлении деятельности совета № 714/нк от 02.11.2012 г.).

Соискатель **Чекушкин Артем Михайлович**, 1991 года рождения, в 2014 году окончил **ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)»**

С 01.09.2014г. по 16.07.2018 г. проходил обучение в аспирантуре **ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (государственный университет)»**.

Во время обучения в аспирантуре сдал кандидатские экзамены по иностранному языку (английский), истории и философии науки (физико-математические науки) и радиофизике.

Справка о сдаче кандидатского экзамена по специальности 01.04.03 "Радиофизика" выдана 15 мая 2019 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования **«Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»**.

Работает научным сотрудником лаб. **«Сверхпроводниковые устройства для приема и обработки информации»** **ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук.**

Диссертация **«Матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами и матрицы криогенных фильтров»** по специальности 1.3.4. «Радиофизика» выполнена в лаб. **«Сверхпроводниковые устройства для приема и обработки информации»** **ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук.**

Научный руководитель: Тарасов Михаил Александрович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаб. **«Сверхпроводниковые устройства для приема и обработки информации»** **ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук.**

Официальные оппоненты:

Арутюнов Константин Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий научно-учебной лаборатории квантовой наноэлектроники **Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова.** Специальность № 01.04.09 – «Физика низких температур».

Третьяков Иван Васильевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории терагерцовых приборов и технологий

отдела приемопередающих комплексов АКЦ ФИАН, специальность 01.04.03 «Радиофизика», дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет», г. Москва в **своем положительном отзыве**, подписанном к.ф.-м.н., А.С. Шураковым, доцентом кафедры общей и экспериментальной физики, и утвержденном первым проректором МПГУ, доктором географических наук, академиком РАО Дроновым В.П., **отметила**, что диссертация Чекушкина А.М. выполнена на актуальную тему, которая посвящена исследованию матриц планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами. Разработка подобных приемных систем продиктована необходимостью повышения максимально допустимой поглощаемой мощности в условиях высокой фоновой нагрузки при сохранении высокой чувствительности для текущих и перспективных задач наземной и бортовой (самолеты, воздушные шары) миллиметровой и субмиллиметровой радиоастрономии. Полученные результаты достоверны, обладают научной значимостью и новизной.

По теме диссертации опубликовано 55 научных работ. Из них 28 статей опубликовано в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов, в том числе 23 публикации входят в библиографические и реферативные базы данных Web of Science и (или) Scopus. Работы публиковались в ведущих специализированных изданиях: Superconductor Science and Technology, Applied Physics Letters, Journal of Physics, Journal of Applied Physics, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Радиотехника и электроника. Публикации по материалам диссертации полностью отражают ее содержание.

В том числе:

1. Чекушкин А.М., Юсупов Р.А., Завьялов В.В., Кузьмин Л.С., Тарасов М.А. Криогенный перестраиваемый спектральный фильтр для калибровки высокочувствительных болометров // Журнал радиоэлектроники, 2017, № 1. Краткое описание: в работе был разработан, изготовлен и измерен криогенный спектральный фильтр для выделения требуемой полосы частот при калибровке криогенных болометров и снятия спектральных характеристик с использованием планковского теплового источника излучения. Получена средняя добротность 25 и пропускание на резонансной частоте 50% в диапазоне частот 100-500 ГГц.
2. М.А. Тарасов, С. Махашабде, А.А. Гунбина, М.Ю. Фоминский, Р.А. Юсупов, Чекушкин А.М., А.Б. Ермаков, А.С. Соболев, В.С. Эдельман, М.А. Мансфельд, В.Ф. Вдовин, Матрица кольцевых антенн с криогенными болометрами диапазона 345 ГГц в интегрирующей полости // Журнал радиоэлектроники, 2018г, №1. Краткое описание: Разработаны, изготовлены и измерены последовательные и параллельные матрицы кольцевых антенн с болометрами структуры сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник (СИНИС). Образцы согласованы с внешним излучением диапазона 250-380 ГГц входным коническим рупором, круглым волноводом диаметром 0.9 мм и интегрирующей полостью в виде конического рупора с контррефлектором. Проведен численный расчет и измерены спектральные характеристики таких устройств. Применение антиотражающего покрытия на кремниевой подложке позволило улучшить чувствительность и однородность спектрального отклика. Измерения проведены в криостате растворения при температурах 80-350 мК. Для последовательной матрицы из 25 антенн с болометрами чувствительность по напряжению на излучение черного тела достигает $3 \cdot 10^9$ В/Вт; линейный отклик для входной мощности составляет более 5 пВт. Токовая чувствительность для матрицы из 25 параллельно соединенных антенн с болометрами составляет $2 \cdot 10^4$ А/Вт. Эквивалентная шуму мощность в обоих случаях составляла $(3-5) \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{1/2}.

3. А.М. Чекушкин, М.А. Тарасов, Р.А. Юсупов, А.А. Гунбина, В.С. Эдельман, Влияние ловушек из нормального металла, андреевского отражения и эффекта близости на охлаждение сверхпроводника в СИНИС структурах// Труды МФТИ, Том10, №2, стр. 64-71, 2018г. Краткое описание: в работе было экспериментально исследовано влияние близости нормального металла и объема сверхпроводниковых электродов на свойства СИНИС-структур. Было показано, что для улучшения охлаждения сверхпроводника оба фактора играют большую роль.
4. M. Tarasov, A. Gunbina, M. Mansfeld, G. Yakopov, A. Chekushkin, R. Yusupov, S. Lemzyakov, V. Edelman and V. Vdovin, Arrays of annular cryogenic antennas with SINIS bolometers and cryogenic receivers for SubTHz observatories // EPJ Web Conf., Volume 195, Article Number 05010, Number of page(s) 2, 2018 DOI: 10.1051/epjconf/201819505010. Краткое описание: Series and parallel arrays of annular antennas optimized for 350 GHz frequency band with SINIS (Superconductor - Insulator - Normal metal - Insulator-Superconductor) bolometers and cryogenically cooled receivers for series of modern SubTHz observatories have been designed, fabricated and studied. The detectors are matched to incoming beam by an immersion sapphire lens. In the low background power case a voltage responsivity approaches $1.5 \cdot 10^9 \text{ V/W}$ corresponding to $\text{NEP} = 10^{-17} \text{ W/Hz}^{1/2}$. The current responsivity for parallel array is $4 \cdot 10^4 \text{ A/W}$ and shot noise limited intrinsic noise equivalent power is $\text{NEP} = 4 \cdot 10^{-18} \text{ W/Hz}^{1/2}$. At the background radiation temperature level of 2.7 K the responsivity to variations of radiation temperature is over 75 $\mu\text{V/K}$. The intrinsic time constant of the bolometer array is 0.1-0.2 μs .
5. Tarasov M., Sobolev A., Gunbina A., Yakopov G., Chekushkin A., Yusupov R., Lemzyakov S., Vdovin V., and Edelman V., Annular antenna array metamaterial with SINIS bolometers // Journal of Applied Physics, Vol.125, Issue 17, 174501, 2019 DOI: 10.1063/1.5054160. Краткое описание: We fabricated and experimentally studied a wideband metamaterial array of annular antennas with Superconductor-Insulator-Normal metal-Insulator-Superconductor (SINIS) bolometers. We measured the optical response at sample temperatures as low as 100 mK using a quasi-optical setup that consisted of an immersion sapphire lens, bandpass mesh filters, and a variable temperature cryogenic blackbody radiation source. The spectral response was measured in a 240–370 GHz range with a Backward Wave Oscillator radiation source. The measured equivalent temperature sensitivity could be reduced to 100 $\mu\text{K/Hz}^{1/2}$ at a 2.7 K radiation temperature level, a value that is suitable for anisotropy measurements in cosmic microwave background radiation.
6. M. Tarasov, A. Gunbina, R. Yusupov, A. Chekushkin, D. Nagirnaya, S. Lemzyakov, V. Vdovin, V. Edelman, A. Kalaboukhov, D. Winkler, Non-Thermal Absorption and Quantum Efficiency of SINIS Bolometer, IEEE TAS 2021, vol. 31, No 5, Aug.2021, P. 2300105, DOI: 10.1109/TASC.2021.3057327. Краткое описание: We study mechanisms of absorption in two essentially different types of superconductor-insulator-normal metal insulator-superconductor (SINIS) bolometers with absorber directly placed on Si wafer and with absorber suspended above the substrate. The figure of merit for quantum photon absorption is quantum efficiency equal to the number of detected electrons for one photon. The efficiency of absorption is dramatically dependent on phonon losses to substrate and electrodes, and electron energy losses to electrodes through tunnel junctions. The maximum quantum efficiency can approach $n = hf/kT = 160$ at $f = 350 \text{ GHz}$ $T = 0.1 \text{ K}$, and current responsivity $dI/dP = e/kT$ in quantum gain bolometer case, contrary to photon counter mode with quantum efficiency of $n = 1$ and responsivity $dI/dP = e/hf$. In experiments, we approach intrinsic quantum efficiency up to $n = 80$ electrons per photon in bolometer with suspended absorber, contrary to quantum efficiency of about one for absorber on the substrate. In the case of suspended Cu and Pd absorber, Kapitza resistance protect from power leak to Al electrodes.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На диссертацию и автореферат поступили положительные отзывы из:

- ИФП им. П. Л. Капицы от к.ф.-м.н. Г.Д. Богомолова (замечаний нет);

- ИКИ РАН от к.ф.-м.н. В.Д. Громова (замечания: нет изучений матриц при высоких мощностях (десятки пиковатт), замечание по оформлению автореферата);

- ИФМ РАН от к.ф.-м.н. В.Л. Вакса (замечания об отсутствии сравнения характеристик изученных матриц с существующими приемными системами, а также по оформлению автореферата);

- ИПФ РАН от д.ф.-м.н. Вдовина В.Ф. (замечания: недостаточно подробно представлена методика моделирования основных характеристик матриц, избыточно описана технология изготовления, недостаточно детально описаны экспериментальные установки для оценки спектрального отклика и вольт-ваттной чувствительности, нет детального сравнения разработанных структур с уже используемыми на наземных обсерваториях);

- ФГБУН ФТИ им. К.А. Валиева РАН от д.ф.-м.н. Ломова А.А. (замечания: нет исследований используемых пленок, жаргонизмы, допущена опечатка на стр.6 в формуле).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается: назначенные советом официальные оппоненты (**Константин Юрьевич Арутюнов**, доктор физико-математических наук, специальность 01.04.09 – «Физика низких температур» профессор, заведующий научно-учебной лаборатории квантовой наноэлектроники Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова, и **Третьяков Иван Васильевич**, кандидат физико-математических наук, специальность 01.04.03 «Радиофизика» старший научный сотрудник лаборатории терагерцовых приборов и технологий отдела приемопередающих комплексов АКЦ ФИАН), по кандидатской диссертации А.М.Чекушкина являются специалистами в области радиофизики и физики сверхпроводников, в частности, в области разработки приемных устройств миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн для приема и обработки внешних электромагнитных сигналов. Они широко известны своими достижениями в данных отраслях науки, имеют многочисленные научные труды в рецензируемых научных журналах, способны определить актуальность, новизну, научную и практическую ценность оппонируемой диссертации.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет» широко известна своими разработками и исследованиями в области распространения радиоволн, создании приемных устройств мм и субММ диапазонов, развитие методов и аппаратуры исследований в области астрофизики. Многочисленные работы её сотрудников в области оппонируемой диссертации свидетельствуют об их способности адекватно оценить результаты, представленные автором для защиты.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы матрицы планарных кольцевых антенн, с интегрированными в них СИНИС-боллометрами.

Измерен оптический отклик матриц параллельно и последовательно соединенных антенн. Для последовательной матрицы из 25 антенн с детекторами вольт-ваттная чувствительность на излучение черного тела достигает $2,6 \cdot 10^9$ В/Вт; мощность насыщения превышает 5 пВт. Данные структуры могут быть использованы в паре с изготовленным и измеренным криогенным

перестраиваемым фильтром для проведения спектральных характеристик в условиях высокой фоновой нагрузки.

Также в работе представлена идея использования матриц электрически малых кольцевых антенн с интегрированными в них СИНИС-детекторами. Данная конструкция позволяет существенно повысить допустимую приемную мощность за счет более плотной компоновки чувствительных элементов. Разработаны, изготовлены и исследованы криогенные фильтры: тонкопленочные, на основе интерферометра Фабри-Перо, капиллярные. Они необходимы для выделения требуемой полосы частот, тем самым позволяя избавиться от внеполосного излучения, которое обычно приводит к насыщению чувствительных приемников мм и суб-мм диапазонов.

Теоретическая и практическая значимость исследования обоснованы тем, что результаты данной работы могут быть применены для текущих радиоастрономических проектов, к примеру, как прототип приемника для БТА.

Оценка достоверности результатов исследования подтверждается соответствием расчетов и различных типов экспериментов: с облучением от источника черного тела в криостате с различными фильтрами, облучением внешним источником ЛОВ, измерениями в разных криостатах и конфигурациях, а также многочисленными докладами по результатам этой работы на конференциях и научных семинарах.

Личный вклад соискателя состоит в: разработке различных топологий матриц кольцевых антенн с СИНИС-детекторами в среде AutoCAD, оптимизации методики изготовления и изготовлении образцов с использованием электронной литографии, методом теневого напыления через подвешенную резистивную маску, автор проводил измерения электрических характеристик и оптического отклика образцов в криостате с откачкой паров He^3 , в криостате растворения в институте физических проблем им. П.Л. Капицы, проводил обработку полученных экспериментальных результатов, готовил статьи для публикаций. Соискатель занимался также разработкой, изготовлением и исследованием различных криогенных фильтров: тонкопленочных, на основе интерферометра Фабри-Перо и капиллярных.

В ходе защиты диссертации в рамках дискуссии членами диссертационного совета были дана высокая оценка уровню работы и отмечено, что работа существенно дополняет и обогащает знания по возможным приемным структурам мм- и субмм диапазонов.

Соискатель Чекушкин А.М. дал исчерпывающие комментарии на вопросы и замечания оппонентов и ведущей организации. Согласился с замечаниями, касающимися оформления текста диссертации и автореферата.

Членами совета были заданы вопросы о том, чем обусловлен интерес к созданию матричных болометров, каковы размеры матрицы в сравнении с длиной волны принимаемого излучения, как ориентированы матрицы антенн по отношению к направлению распространения принимаемого излучения, какие процессы происходят в подложке матрицы при поглощении падающего излучения, какова геометрия расположения слоев в матричной структуре, каким образом при помощи таких матриц принимать реликтовое излучение, просили уточнить функциональную структуру матрицы приемных антенн в сравнении со

структурой массива антенн радиодиапазона, какие работы имеются в области применения матричных болометров для медицинской диагностики.

Соискатель дал ответы и необходимые пояснения, которые совет посчитал удовлетворительными.

Диссертационная работа Чекушкина А.М. является законченной научно-квалификационной работой, которая удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 824, предъявляемым к диссертациям на соискании ученой степени кандидата наук.

На заседании 8 июля 2022 г. диссертационный совет за решение научной и практической задачи разработки новых приемных устройств мм и субмм длин волн, а также за разработку новых типов фильтров, предназначенных для криогенных измерений, принял решение присудить Чекушкину А.М. ученою степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования участвующие в заседании члены диссертационного совета в количестве 16 человек, из которых 10 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из общего числа 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя диссертационного
совета, д.ф.-м.н., профессор



Дмитриев А.С.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН
«8» июля 2022 г.

Кузьмин Л.В.