



«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор МПГУ  
доктор географических наук  
академик РАО  
Добров Виктор Павлович

«14» июня 2022 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Чекушкина Артема Михайловича  
«Матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами и матрицы  
криогенных фильтров»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Диссертационная работа Чекушкина А.М. посвящена решению проблемы насыщения приемных устройств на наземных радиотелескопах. Ряд задач современной радиоастрономии требует использования приемников ЭМ излучения, сочетающих высокую вольт-ваттную чувствительность (не менее  $10^8$  В/Вт), широкий динамический диапазон и низкую мощность эквивалентную шуму (МЭШ) (не более  $10^{-16}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>). В качестве одного из возможных решений для создания приемника субмиллиметрового излучения с данным набором характеристик автором предложено использовать конструкцию, состоящую из матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами. В работе предложены два варианта исполнения матриц, предполагающие использование традиционных и электрически малых кольцевых антенн. В работе также детально описаны процессы разработки и создания фильтров миллиметрового и субмиллиметрового волновых диапазонов, в том числе, тонкопленочного, капиллярного, перестраиваемого криогенного по типу интерферометра Фабри-Перо. Использование последнего представляется весьма перспективным в составе сверхчувствительного криогенного спектрометра.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций автора и цитированной литературы. Работа содержит 146 страниц. В списке литературы представлено 94 источника, большая часть из которых являются англоязычными, что подчеркивает активность работ в области диссертационного исследования за рубежом и ее динамичное развитие.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и определены ее цели. Сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы, методология и методы исследования, обоснована степень достоверности, и описана апробация основных результатов.

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней дан краткий анализ существующих технологий криогенных детекторов, их фундаментальные и технические особенности. Выделены основные характеристики, выступающие



критерием качества при проектировании сверхпроводникового детектора, включая компактность, МЭШ, вольт-ваттную чувствительность, время отклика. Приведено описание использования матриц приемных элементов. Приведено описание приемных элементов типа дипольных и кольцевых антенн. Указаны их достоинства и недостатки. Описаны фильтры миллиметрового и субмиллиметрового волновых диапазонов.

**Во второй** главе представлены детали проектирования СИНИС-детектора с центральной рабочей частотой 345 ГГц. Описаны параметры и приведены результаты компьютерного моделирования для двух случаев засветки детектора ЭМ излучением: со стороны подложки и антенны. Предложена геометрия матрицы СИНИС-детекторов, обеспечивающая полосу входных рабочих частот не менее 180 ГГц и возможность использования (в сочетании с полосовым фильтром) в составе спектрометра диапазона 280–460 ГГц.

**В третьей** главе описаны способы изготовления матриц планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами различной топологии, предназначенных для: а) изучения особенностей приема ЭМ излучения при засветке со стороны подложки и антенн, б) исследования влияния близости нормального металла различного объема на качество СИН-переходов. Приведено описание экспериментальных установок в части оптического тракта и криостатов, представлена электрическая схема для проведения измерений.

**Четвертая** глава посвящена проектированию, изготовлению и характеристике полосовых фильтров миллиметрового и субмиллиметрового волновых диапазонов, в том числе, тонкопленочного, капиллярного, перестраиваемого криогенного по типу интерферометра Фабри-Перо.

**В пятой** главе представлены результаты экспериментальных исследований разработанных приемных матриц на основе кольцевых антенн с включенными в них СИНИС-детекторами. Приведены измеренные вольт-ваттные и ампер-ваттные характеристики для частоты 345 ГГц. Представлены результаты измерений спектральных откликов матриц кольцевых антенн с полуволновым диаметром кольца и с существенно меньшим диаметром – электрически малых антенн. Для последних получен динамический диапазон более 30 дБ. Проведено экспериментальное исследование влияния близости нормального металла и объема сверхпроводника на характеристики СИН-перехода.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования:

1. Разработаны, изготовлены и измерены квазиоптические фильтры для криогенных электромагнитных измерений: полосно-пропускающие, перестраиваемый на основе интерферометра Фабри-Перо, капиллярные матричные фильтры. Полосно-пропускающие фильтры имеют полосу пропускания 10–90 ГГц и ослабление вне полосы порядка 10 дБ. Перестраиваемый фильтр способен работать при криогенных температурах и в полосе частот 100–500 ГГц с шириной полосы пропускания 4 ГГц. Волноводные фильтры с характерным диаметром волновода 0,54 мм имеют пропускание выше 350 ГГц на уровне 40%. Затухание на частотах ниже 200 ГГц более 40 дБ.



2. Разработана и успешно использована методика изготовления матриц планарных кольцевых антенн с интегрированными СИНИС-детекторами, в которых убран слой «тонкого золота». Это позволило упростить технологическую карту изготовления образцов, улучшить теплоотвод финальной структуры за счет более толстого слоя нормального металла, используемого для формирования массивов антенн (200 нм против 35 нм ранее).

3. Разработаны, изготовлены матрицы планарных кольцевых антенн для приема внешнего электромагнитного излучения диапазона 345 ГГц с интегрированными в них СИНИС-детекторами. МЭШ разработанных структур не хуже  $10^{-17}$  Вт/Гц<sup>-1/2</sup>.

4. Измерен оптический и спектральный отклик на внешнее электромагнитное излучение матриц параллельно и последовательно соединенных кольцевых антенн с характерным диаметром 300 мкм. Для последовательной матрицы из 25 антенн с детекторами чувствительность по напряжению на излучение черного тела достигает  $3 \cdot 10^9$  В/Вт; мощность насыщения превышает 5 пВт. Токовая чувствительность для матрицы из 25 параллельно соединенных антенн с детекторами составляет  $2 \cdot 10^4$  А/Вт.

5. Экспериментально измерены спектральные характеристики матриц кольцевых антенн с СИНИС-детекторами. Ширина полосы пропускания превышает 100 ГГц. Исследовано влияние расположения образца на однородность и мощность приема сигнала при облучении: с обратной стороны подложки, со стороны антенн.

6. Разработана, изготовлена и экспериментально исследована приемная матрица электрически малых антенн с СИНИС-детекторами, характерный диаметр кольца антенны 54 мкм. Измерен оптический и спектральный отклик. Экспериментально получена вольт-ваттная чувствительность выше  $10^9$  В/Вт, динамический диапазон более 30 дБ, полоса пропускания более 130 ГГц. Использование матрицы кольцевых антенн типа метаматериала позволило увеличить полосу пропускания в сравнении с матрицей полуволновых кольцевых антенн.

Представленные в диссертации результаты получены впервые и являются **новыми**. Они также являются **научно и практически значимыми**, так как тесно связаны с физикой и технологией перспективных приемников ЭМ излучения для решения задач современной радиоастрономии в части приема сигнала в условиях повышенной фоновой мощности.

**Достоверность и обоснованность** результатов диссертационного исследования подтверждается соответствием теоретических расчетов и натурного эксперимента.

**Вклад автора** в исследование заключается в проектировании и изготовлении экспериментальных образцов, проведении измерений и обработке полученных результатов.

**Апробация работы.**

Результаты диссертационной работы Чекушкина А.М. опубликованы в журналах высокого международного уровня и многократно представлялись на



всероссийских и международных конференциях. Материалы диссертации представлены в 55 работах, из которых: 28 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК при Минобрнауки России и индексируемых в РИНЦ, в том числе, 23 публикации в журналах, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus, и 22 публикации в сборниках трудов конференций, 6 патентов РФ.

К диссертационной работе есть **ряд замечаний**:

1. В основном результате №3 диссертационного исследования не верно указана размерность заявленной МЭШ – Вт/Гц<sup>-1/2</sup>.
2. Расчет СИНИС-детекторов в главе 2, п.1 производится с использованием формул, представленных в обзорной части работы, что затрудняет чтение.
3. В главе 2, п. 3 при описании конкурирующих способов засветки образцов ЭМ излучением указано, что в случае засветки со стороны подложки, ее толщина составляет примерно 0,5 длины волны излучения (далее по тексту приведено значение 280 мкм, что скорее соответствует 1 длине волны на частоте излучения 345 GHz). При этом не представлены расчетные спектры отражения и принимаемой мощности в зависимости от толщины подложки для данного способа засветки. Этот вопрос является крайне важным и требует пояснений со стороны автора, так как напрямую связан с защищаемым положением № 2.
4. В главе 2, п.4 представлены графики с результатами 3D ЭМ моделирования основных конфигураций кольцевых антенн с явным указанием авторства Соболева А.С. и Гунбиной А.А. Требуется более четкое разграничение вклада автора в проектирование экспериментальных образцов с точки зрения ЭМ дизайна.
5. В главе 5, п. 2 и п. 3 при описании методики измерения чувствительности образцов указано, что в качестве эталонного источника мощности используется черное тело с перестраиваемой в диапазоне 2–10 К температурой. Заявлена центральная частота излучения 345 Гц (или 350±35 ГГц), при этом не указано, как именно в эксперименте была ограничена полоса частот излучения черного тела.
6. В главе 5, п. 2, рис. 5.12 содержит кривые линейности отклика изучаемых образцов. Требуется детальное объяснение автора в части принципиальных ограничений и полученных в эксперименте минимальных значений напряжения.
7. Есть замечания в части стилистики изложения материала, наличия опечаток и неточностей.

Однако, отмеченные недостатки не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы. Текст автореферата в достаточной степени отражает содержание текста диссертации.

Диссертация была представлена автором на научном семинаре Лаборатории квантовых детекторов МПГУ 27 мая 2022 года. В семинаре приняли участие также сотрудники других подразделений МПГУ. По заключению, поддержанному всеми участниками семинара, диссертация Чекушкина А.М. представляет законченные результаты актуального исследования, выполненного на мировом уровне. Выносимые на защиту положения доказаны экспериментальными результатами и их сопоставлением с имеющимися теоретическими моделями.

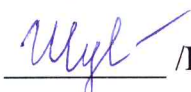
По объему, структуре, актуальности, научной новизне и значимости полученных результатов диссертация полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а её автор, Чекушкин Артем Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

**Составитель отзыва:**

Шураков Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика, доцент кафедры общей и экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет». Адрес для корреспонденции: 119991, Россия, Москва, ул. М. Пироговская, дом 1, строение 1

« 14 » июня 2022



 /Шураков А.С./

Подпись Шуракова А.С. заверяю



**Сведения об организации:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет». Адрес: 119991, город Москва, улица М. Пироговская, дом 1, строение 1. Телефон: +7(499)245-03-10. Сайт: <http://mpgu.su>.