

**Аннотация проекта (ПНИЭР), выполняемого в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы»**

**Номер соглашения о предоставлении субсидии (государственного контракта)**  
14.607.21.0100

**Название проекта**

Терагерцовый анализатор газовых смесей на основе туннельных наноструктур для медицинской диагностики и систем безопасности

**Тематическое направление**

Индустрия наносистем

**Исполнитель**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук

**Цели и задачи исследования**

Проект направлен на решение задачи газового анализа в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот. Проблема газового анализа в настоящее время является крайне актуальной в таких областях, как медицинские исследования и системы безопасности.

Основной целью данного проекта является создание и испытание принципиально нового высокочувствительного газоанализатора на основе туннельных наноструктур для сверхточного анализа газовых смесей, работающего в ТГц диапазоне частот. Анализатор обладает высокой чувствительностью и компактностью, низким энергопотреблением и высоким спектральным разрешением.

Таким образом, основными задачами проекта являются:

- Разработка технологии изготовления туннельных наноструктур, работающих в ТГц диапазоне, для исследования газовых смесей;
- Оптимизация режимов работы спектрометра на основе наноструктур для работы совместно с газовой измерительной ячейкой. Разработка методики и алгоритмов измерения спектров сложных химических соединений (аммиак, ацетон, перекись водорода, и т.д.) и их смесей в газовой измерительной ячейке с помощью спектрометра;
- Определение газов-маркеров для медицинских тестов и тестов для систем безопасности. Выявление комбинации газов для некоторых задач диагностики, мониторинга заболеваний и для задач безопасности и противодействия терроризму;
- Разработка лабораторного прототипа спектрометра для сверхчувствительного анализа газовых смесей;
- Диагностика наноструктур и спектрометра на их основе в рамках лабораторного прототипа прибора и его апробация для быстрого обнаружения сложных химических соединений с системами управления и регистрации.

**Актуальность и новизна исследования**

На сегодняшний день во всем мире прилагаются большие усилия по освоению терагерцового (ТГц) диапазона частот. Дело в том, что наиболее сильные линии поглощения разнообразных молекул, представляющих интерес для химии высокочистых веществ, медицины и биологии, экологии, промышленности лежат в ТГц диапазоне. Поэтому существует достаточно большое количество новых

возможностей применения ТГц излучения в научных исследованиях и в прикладных областях: медицина и биология, системы безопасности, радиоастрономия и астрофизика, экология и мониторинг окружающей среды, анализ высокочистых веществ для промышленности, системы связи и др.

#### 1) Медицина

Нестационарная спектроскопия в ТГц диапазоне, обладающая чувствительностью на уровне десятых долей ppm, селективностью, возможностью измерения концентраций исследуемых веществ и простотой использования, может дать уникальный метод для анализа выдыхаемого воздуха.

#### 2) Экологический мониторинг и атмосферные исследования

Развитие ТГц спектроскопии атмосферы в большей степени было стимулировано необходимостью удаленного измерения количества ОН. Исследование дневных колебаний концентрации этих молекул (NO, OH, H<sub>2</sub>O, ClO) является существенным фактором для контроля уменьшения озона.

#### 3) Промышленность

Одной из главных проблем современной промышленности является контроль чистоты газов, используемых в производстве. Например, для реализации металлорганической газофазной эпитаксии – важнейшей технологии получения полупроводниковых материалов – необходимы высокочистые летучие вещества, в первую очередь аммиак.

### **Описание исследования**

В данном проекте разработан спектрометр ТГц диапазона, обладающий чувствительностью, близкой к квантовому пределу, а также комплекс методик для его применения с целью исследования газовых смесей для медицинской диагностики и систем безопасности. Основным элементом спектрометра является сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП), концепция которого была создана и апробирована авторами данного проекта. СИП представляет собой изготовленную методами нанотехнологии однокристалльную СВЧ микросхему, которая включает в себя СИС-смеситель с планарной сверхпроводниковой приемной антенной и сверхпроводниковый генератор гетеродина. К его достоинствам относятся компактность, предельная чувствительность (ограниченная лишь квантовыми флуктуациями), высокое спектральное разрешение и малое энергопотребление, такой набор параметров недостижим при использовании традиционных технологий. Для проведения исследований использован разработанный авторами спектрометр с фазовой манипуляцией воздействующего на газ излучения, позволяющий получить рекордные параметры по чувствительности. Использован разработанный и изготовленный авторами проекта рабочий макет микроволнового спектрометра, реализующего новый метод Фурье-спектроскопии с быстрым свипированием частоты воздействующего излучения.

Для реализации приемных систем с предельными параметрами требуются туннельные переходы субмикронных размеров с чрезвычайно высокой плотностью тока (толщина туннельного барьера 1 - 1.5 нм). Поэтому одной из задач проекта является оптимизация технологии изготовления туннельных наноструктур с помощью методов электронно-лучевой литографии и плазмохимического травления. В результате выполнения проекта развиты и апробированы новые методы формирования туннельных наноструктур и интегральных микросхем на их основе. Это сделало возможным практическую реализацию интегрального спектрометра с шумовой температурой менее 120 К в частотном диапазоне 450 - 700 ГГц и спектральным разрешением лучше 0,5 МГц. Эти параметры недостижимы для традиционных спектрометров ТГц диапазона. Такая уникальная комбинация параметров стала возможной

благодаря принципиально новому подходу - интеграции различных сверхпроводниковых элементов в единое устройство, изготовленное методами наноэлектроники на одной микросхеме. Интеграция элементов супергетеродинного приёмника на одной микросхеме даёт большой выигрыш в габаритах и весе устройства по сравнению с существующими приборами: так, микросхема имеет размеры  $4 \times 4 \text{ мм}^2$ , а смесительный модуль вместе с магнитным экраном весит не более 0,5 кг. Интегральный спектрометр для детектирования веществ-маркеров (био-маркеров выдыхаемого воздуха, маркеров ядовитых и взрывчатых веществ) используется совместно с внешним ТГц источником на основе лампы обратной волны. Конечный прибор представляет собой миниатюрный терагерцовый сенсор для анализа газовых смесей и выявления веществ-маркеров в исследуемой смеси. Такой сенсор является немаловажным вкладом в развитие компонентной базы медицинских приборов.

Еще одной задачей проекта является методика однозначной идентификации различных веществ-маркеров с помощью терагерцовой спектроскопии, отработка методов количественного определения содержания конкретного вещества в газовой смеси, наработка методик наиболее эффективного использования прибора для неинвазивной диагностики заболеваний человека и выявления опасных веществ. Для решения этих задач проведён целый комплекс измерений для определения содержания выбранных маркеров у пациентов в норме, определён статистически достоверный уровень концентрации для каждого маркера и соответствующего этому маркеру заболевания, превышение которого может использоваться в качестве сигнала для начала более глубокой диагностики и лечения. В результате проведения исследований станет возможным предоставление медицинским организациям новых и эффективных методов и средств для проведения исследований и диагностики заболеваний человека на ранней стадии.

Использование интегральных приемных устройств на основе туннельных наноструктур позволяет не только реализовать предельно достижимые параметры, но и существенно снизить стоимость оборудования. Учитывая уникальность своих характеристик и габаритов, разрабатываемый спектрометр претендует на заметную часть рынка в сфере медицинской диагностики, он может быть также использован для экологического мониторинга, а также в системах безопасности и противодействия терроризму.

### **Результаты исследования**

На первом этапе работ был проведён тщательный обзор современных существующих приборов и методов газового анализа, в том числе анализа, имеющего отношения к медицинским исследованиям и системам безопасности. Был проведён сравнительный анализ существующих на сегодняшний день методов газовой хроматографии, масс-спектрометрии, изучено применение электрохимических сенсоров, ультрафиолетовой флуоресценции и инфракрасной спектроскопии. В результате сделанного анализа было проведено обоснование актуальности

методов ТГц спектроскопии в медицинской диагностике заболеваний на основе исследования газовых составляющих выдыхаемого человеком воздуха.

Для разрабатываемого прибора требуется высокочувствительный элемент для детектирования различных веществ-маркеров в исследуемой газовой смеси. Предложен детектор на основе джозефсоновских туннельных наноструктур Nb/AlN/NbN и Nb/AlOx/Nb.

На втором этапе работ разработана компьютерная модель туннельных наноструктур, получены результаты моделирования и численного расчёта основных элементов анализатора на основе туннельных наноструктур. Для охлаждения чувствительного элемента до рабочих температур разработаны конструкции двух различных установок: с охлаждением на основе заливного криостата с использованием жидкого гелия и охлаждение при помощи системы замкнутого цикла.

Проведены работы по моделированию установки анализатора, разработаны алгоритмы его работы.

На третьем этапе проекта была оптимизирована технология изготовления туннельных наноструктур на основе Nb/AlOx/Nb и Nb/AlN/NbN с необходимыми параметрами и изготовлены ключевые научно-технические результаты проекта:

экспериментальные образцы чувствительного элемента ТАГС на основе туннельных наноструктур, экспериментальный образец газовой ячейки с системой напуска, откачки, возможностью измерения давления и поддержания его на требуемом уровне; и собственно экспериментальный образец ТАГС, состоящий комплексно из вновь разработанных и заимствованных элементов, приборов и оборудования.

На четвёртом этапе работ проведено комплексное исследование ключевых научно-технических результатов проекта - экспериментальных образцов чувствительного элемента на основе туннельных наноструктур, экспериментального образца измерительной ячейки ТАГС и экспериментального образца конечного прибора. Исследование проведено в рамках

лабораторных испытаний экспериментальных образцов.

Чувствительный элемент ТАГС на основе туннельных наноструктур Nb/AlN/NbN и Nb/AlOx/Nb имеет плотность туннельного тока  $\sim 6-7$  кА/см<sup>2</sup> и толщину туннельного барьера  $\sim 1,2$  нм, охлаждается до рабочей температуры 4,8-5 К в системе охлаждения на основе заливного криостата, обладает рабочим диапазоном частот 450-700 ГГц. Экспериментальный образец измерительной ячейки ТАГС длиной  $\sim 35$  см работает в диапазоне давлений исследуемой газовой смеси от 0,00001 мБар до 1000 мБар с возможностью поддержания стабильного давления в пределах отклонения 0,1% от заданной величины в течение не менее 5 минут. Экспериментальный образец ТАГС обладает чувствительностью на уровне шумовой температуры 130 К и

спектральным разрешением порядка 0,1 МГц в полосе промежуточных частот 4-8 ГГц, способен работать в непрерывном режиме более 8 часов от одной заливки в криостат жидкого гелия.

Авторам проекта неизвестны аналогичные работы в данном направлении.

### **Практическая значимость исследования**

Потенциальными потребителями разрабатываемого анализатора газовых смесей являются:

- медицинские и лечебные учреждения;
- диагностические центры, нуждающиеся в быстром и точном определении диагноза пациента, его состояния;
- частные и государственные службы безопасности, производящие досмотр на наличие ядовитых и взрывчатых веществ (в аэропортах, на вокзалах, в зданиях государственных учреждений);
- научные и промышленные предприятия, выпускающие измерительную технику для медицинских целей, а также разрабатывающие и выпускающие технику для систем обеспечения безопасности, для экологического мониторинга и специальных применений;
- промышленные предприятия, нуждающиеся в контроле чистоты газов, используемых в производстве, их примесного состава, а также контроле процессов очистки газов.