

## **Металлы. Сверхпроводники.**

### **Разработка физических принципов построения и реализации спектрометра диапазона 500÷700 ГГц со сверхпроводниковым интегральным приемником**

В.Л.Вакс<sup>1</sup>, В.Ю.Балакирев<sup>1</sup>, А.Н.Панин<sup>1</sup>, С.И.Приползин<sup>1</sup>, В.П.Кошелец<sup>2</sup>,  
О.С.Киселев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт физики микроструктур  
РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, Россия.

<sup>2</sup> Учреждение Российской академии наук Институт радиотехники и электро-  
ники им. В.А.Котельникова РАН, ул. Моховая, 11, корп. 7, Москва, Россия

e-mail: [elena@ipm.sci-nnov.ru](mailto:elena@ipm.sci-nnov.ru)

Разработан спектрометр, работающий на эффекте свободно затухающей поляризации, в диапазоне частот 500 ÷ 700 GHz. Источником излучения являются гармоники умножителя частоты на квантовых полупроводниковых сверхрешетках. Приемная система спектрометра построена с использованием интегрального сверхпроводникового приемника на основе СИС смесителя и ФФО гетеродина. Спектрометр был использован для измерений линий поглощения NH<sub>3</sub> в выдыхаемом воздухе (572 GHz).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты - 09-02-97039-р\_поволжье\_a, 09-02-00246, 09-02-12172-офи-м и Программы Президиума РАН «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов», проект «Квантовые когерентные наноструктуры для приема и генерации электромагнитного излучения терагерцового диапазона».

PACS 07.57.Pt, 85.25.-j, 85.30.-z

Терагерцовый (ТГц) диапазон частот является привлекательным для спектроскопических и, в первую очередь, прецизионных аналитических исследований, поскольку в нем находятся наиболее высокоинтенсивные линии поглощения многих важных молекул. Поэтому реализация высокочувствительного спектрометра, который можно применять для контроля высокотехнологичных процессов, медицинской диагностики, создания систем обеспечения безопасности, представляется весьма актуальной задачей.

Одной из основных проблем реализации высокочувствительного спектрометра является создание высокочувствительной приемной системы, удовлетворяющей требованиям спектроскопии. Имеющиеся в настоящее время приемники ТГц частотного диапазона не обладают высокой чувствительностью, также трудно обеспечить широкодиапазонность. Разработанные легкие и компактные сверхпроводниковые интегральные ТГц приемники с предельной чувствительностью, высоким спектральным разрешением и малым энергопотреблением чрезвычайно привлекательны для спектроскопических исследований.

В работе рассмотрен спектрометр, работающий на эффекте свободно затухающей поляризации, в диапазоне частот  $500 \div 700$  GHz. Суть разработанного метода состоит в следующем: в результате взаимодействия частотно-модулированного (ЧМ) излучения с резонансно поглощающими молекулами происходит периодический процесс наведения и распада макроскопической поляризации молекул [1]. Сигнал, переизлучаемый молекулами, отстает по фазе от сигнала излучения, и этот эффект используется для приема полезного сигнала.

Упрощенная блок-схема спектрометра представлена на рис. 1. Сигнал опорного генератора умножается с помощью твердотельных устройств -

квантовых полупроводниковых сверхрешеток (КПСР). В предложенной схеме молекулы газа взаимодействуют с резонансной ТГц гармоникой. Высокодобротная ячейка может быть использована для того, чтобы увеличить мощность резонансной моды и подавить другие.

Необходимые требования к спектрометрам для обеспечения прецизионных измерений – доплеровское разрешение ( $\sim 10^{-6}$ ) и измерение частоты с точностью  $\sim 10^{-8} \div 10^{-10}$ .

Источником ТГц излучения являются гармоники (вплоть до 54-й вблизи 8100 GHz), получаемые умножением частоты синтезатора на генераторе Ганна, работающего в режиме частотной модуляции в диапазоне частот  $100 \div 120$  GHz, с применением умножителя на основе квантовых полупроводниковых сверхрешеток (КПСР).

Блок-схема твердотельного синтезатора частоты с частотной модуляцией излучения представлена на рис. 2. Гармоника опорного синтезатора крупной сетки частот, работающего в диапазоне частот  $9 \div 10.5$  GHz, смешивается на гармоническом смесителе с частью ответвленной мощности выходного сигнала генератора Ганна. Сигнал ПЧ в диапазоне  $400 \div 440$  MHz усиливается и подается на частотно-фазовый детектор (ЧФД) в системе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Опорным синтезатором для ЧФД является синтезатор мелкой сетки частоты, работающий в диапазоне  $400 \div 440$  MHz с минимальным шагом по частоте 10 kHz. Сигнал с выхода ЧФД проходит через петлевой фильтр и подается на вход управления частотой генератора Ганна, тем самым замыкая петлю ФАПЧ.

ЧМ-модулятор устанавливает частоту и девиацию опорного генератора промежуточной частоты (ПЧ), которые потом переносятся в выходной сигнал генератора Ганна. Полоса ФАПЧ выбрана такой, чтобы перенести без

искажений частотную модуляцию из канала ПЧ в выходной сигнал. Все параметры твердотельного синтезатора, а именно, частота излучения и параметры модуляции, устанавливаются от компьютера через микроконтроллер.

Приемная система спектрометра разработана с использованием сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) на основе смесителя со структурой сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) и ФФО (Flux Flow Oscillator - генератор бегущих вихрей) в качестве гетеродина. Блок-схема разработанной в ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН микросхемы СИП представлена на рис. 3. Частотное разрешение приемника (наряду с шумовой температурой и диаграммой направленности) является одним из основных параметров спектрометра. Для того, чтобы получить требуемое частотное разрешение сверхпроводниковый генератор гетеродина интегрального приемника должен быть синхронизирован к опорному синтезатору. Для реализации этих требований разработана концепция интегрального приемника с системой ФАПЧ криогенного генератора гетеродина [2]. Согласно этой концепции сигнал сверхпроводникового генератора распределяется между двумя СИС-смесителями, один из них используется как приемный квазичастичный элемент, в то время как второй работает в режиме гармонического смесителя в системе ФАПЧ.

Для интегрального приемника реализован частотный диапазон  $500 \div 700$  GHz, шумовая температура менее 200 К, полоса ПЧ  $4 \div 8$  GHz, диаграмма направленности с боковыми лепестками  $< -17$  dB, спектральное разрешение 1 MHz. По сравнению с разработанными к настоящему времени системами с близкими параметрами предлагаемый спектрометр имеет значительно больший диапазон входных частот, значительно меньшие габариты и энергопотребление.

На рис. 4 представлена блок-схема ПЧ процессора и системы накопления данных.

В нее включен смеситель, на котором выходной сигнал в диапазоне  $4 \div 8$  GHz смешивается с опорным генератором 3.6 GHz. Сигнал ПЧ проходит через полосовой фильтр  $0.4 \div 0.8$  GHz на детектор, использующий диоды с барьером Шоттки.

Выделенный сигнал модуляции усиливается видеоусилителем и поступает на вход синхронно-фазового детектора. В качестве опорного сигнала для этого детектора используется регулируемый по фазе сигнал ЧМ-модулятора.

Регулировка фазы позволяет выделить наибольшую амплитуду полезного сигнала и уменьшить сигналы помехи, связанной с интерференцией в ТГц тракте и неравномерностями в ПЧ трактах.

После фильтра низких частот (ФНЧ) полезный сигнал оцифровывается 16-битным аналогово-цифровым преобразователем (АЦП), где происходит предварительное накопление. Дальнейшее накопление производится с помощью программного обеспечения в компьютере.

С использованием спектрометра были проведены тестовые измерения спектров поглощения ряда молекул. В частности проводились измерения в образцах выдыхаемого воздуха, представляющего, с точки зрения спектроскопии, многокомпонентную газовую смесь, на частоте линии поглощения аммиака (572 GHz). Ячейка представляла собой стеклянную трубу диаметром 10 см и длиной 60 см с плоскими оптически прозрачными окнами в торцах. Большой диаметр ячейки позволял значительно уменьшить влияние молекул газа, осажденных на стенках ячейки, на общий результат измерений. Диаметр пучка излучения, проходящего через центральную ось ячейки,

не превышал 3 см. Продукты газообмена со стенками ячейки не попадали в этот пучок. Измерения проводились в режиме непрерывной прокачки исследуемого газа при установившемся давлении в ячейке  $\sim 3 \cdot 10^{-2}$  torr. Для калибровки использовался 1% раствор аммиака, разбавленный дополнительно в пропорции 1/100. Таким образом, концентрация газа в калибровочном образце составляла  $10^{-4}$  мол. долей. Для более точной калибровки необходимо изготавливать прецизионные калибровочные смеси, проверяя их с помощью других методов. Запись линии поглощения  $\text{NH}_3$  в выдыхаемом воздухе приведена на рис.5. Согласно проведенной калибровке можно с определенной точностью измерять концентрацию  $\text{NH}_3$  в выдохе человека с целью последующей медицинской диагностики.

Проведенные тестовые измерения вращательных спектров ряда основных молекул подтвердили высокую чувствительность прибора (не хуже 1 ppb) при спектральном разрешении, ограниченном лишь эффектом Доплера. Прибор может быть востребован для радиоастрономических и атмосферных исследований, для неинвазивной диагностики в медицине, а также для метрологических измерений.

## Список литературы

1. V.L.Vaks, A.B.Brailovsky, V.V.Khodos. Int. J. Infrared & Millimeter Waves. **20**. 883 (1999).
2. Shitov S.V., Koshelets V.P., Ermakov A.B., Dmitriev P.N., Filippenko L.V., Khodos V.V., Vaks V.L., Yagoubov P.A., Vreeling W.J., Wesselius P.R. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. **13**. 684 (2003).

## Подписи к рисункам

**Рис. 1.** Блок-схема спектрометра ТГц частотного диапазона с интегральным приемником.

**Рис.2.** Блок-схема твердотельного синтезатора частоты.

**Рис.3.** Блок-схема микросхемы СИП (1 - Оптический вход 500-700 GHz; 2 - СИС смеситель; 3 - Гармонический смеситель (ГС); 4 - ФФО как гетеродин 500-700 GHz; 5 - НЕМТ усилитель; 6 – Усилитель; 7 - ПЧ процессор и ЦАП; 8 - Система накопления данных, управляемая компьютером; 9 - Управление ФФО, СИС, ГС)

**Рис.4.** Блок схема ПЧ процессора и системы накопления данных.

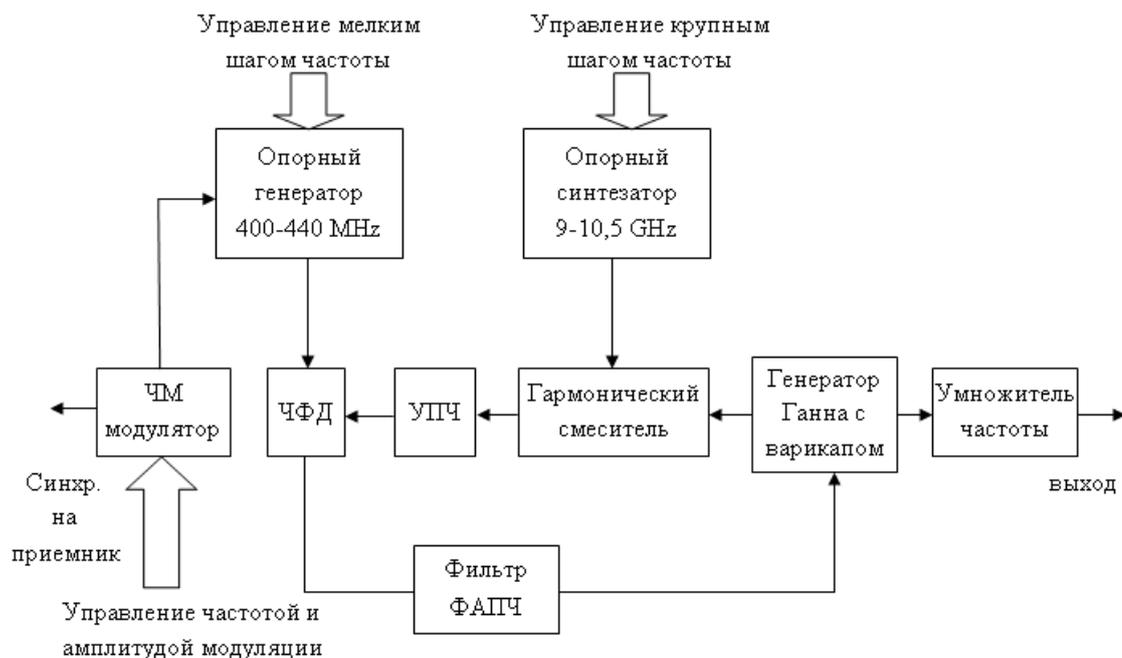
**Рис.5.** Запись линии поглощения  $\text{NH}_3$  на частоте 572 GHz в образце выдыхаемого воздуха.



В.Л.Вакс, В.Ю.Балакирев, А.Н.Панин, С.И.Приползин, В.П.Кошелец,  
О.С.Киселев

Разработка физических принципов построения и реализации спектрометра  
диапазона 500-700 GHz со сверхпроводниковым интегральным приемником

Рис.1.

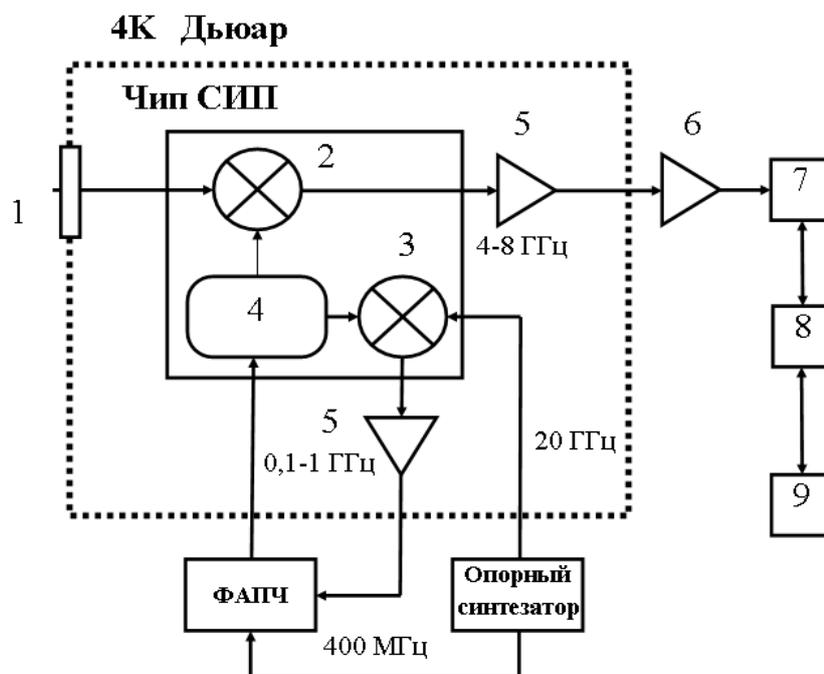


В.Л.Вакс, В.Ю.Балакирев, А.Н.Панин, С.И.Приползин, В.П.Кошелец,

О.С.Киселев

Разработка физических принципов построения и реализации спектрометра  
диапазона 500-700 GHz со сверхпроводниковым интегральным приемником

Рис.2

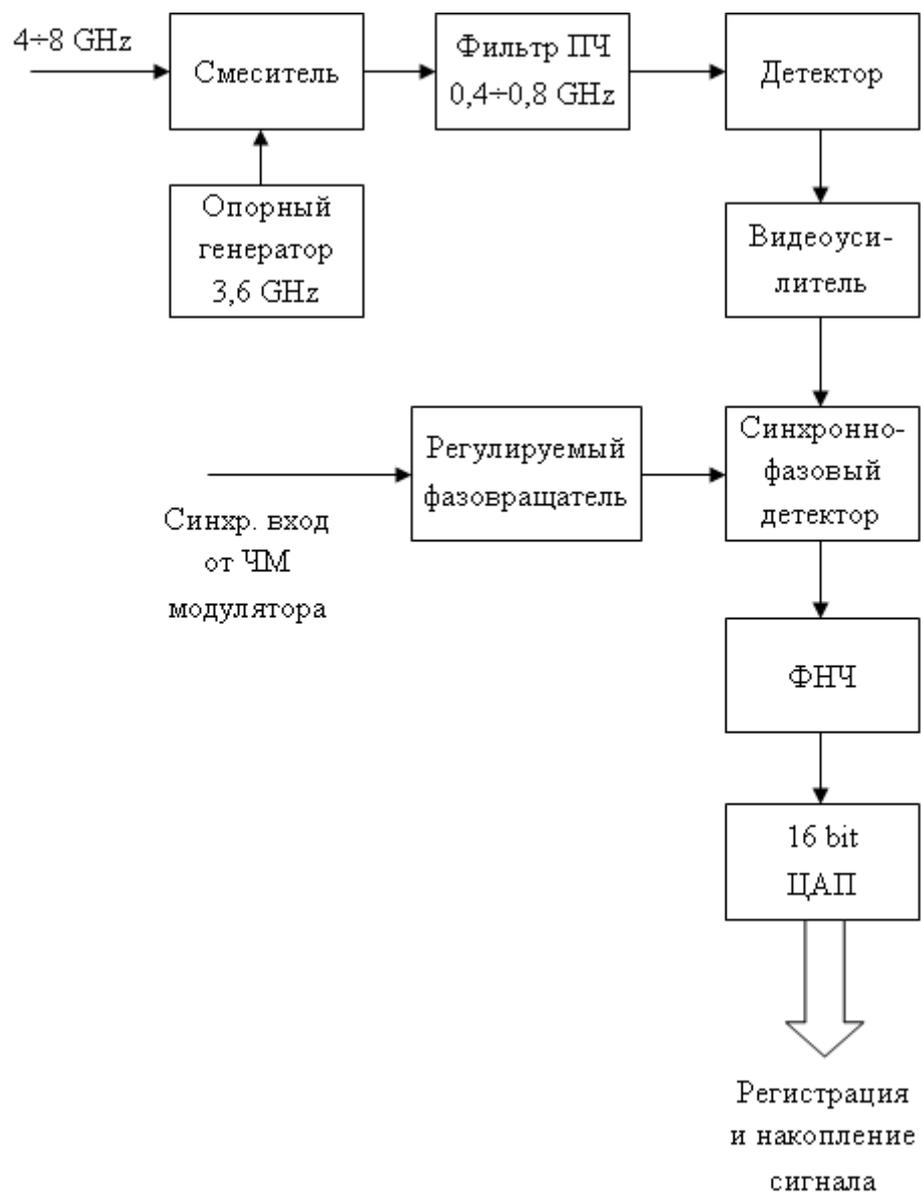


В.Л.Вакс, В.Ю.Балакирев, А.Н.Панин, С.И.Приползин, В.П.Кошелец,

О.С.Киселев

Разработка физических принципов построения и реализации спектрометра  
диапазона 500-700 GHz со сверхпроводниковым интегральным приемником

Рис.3.

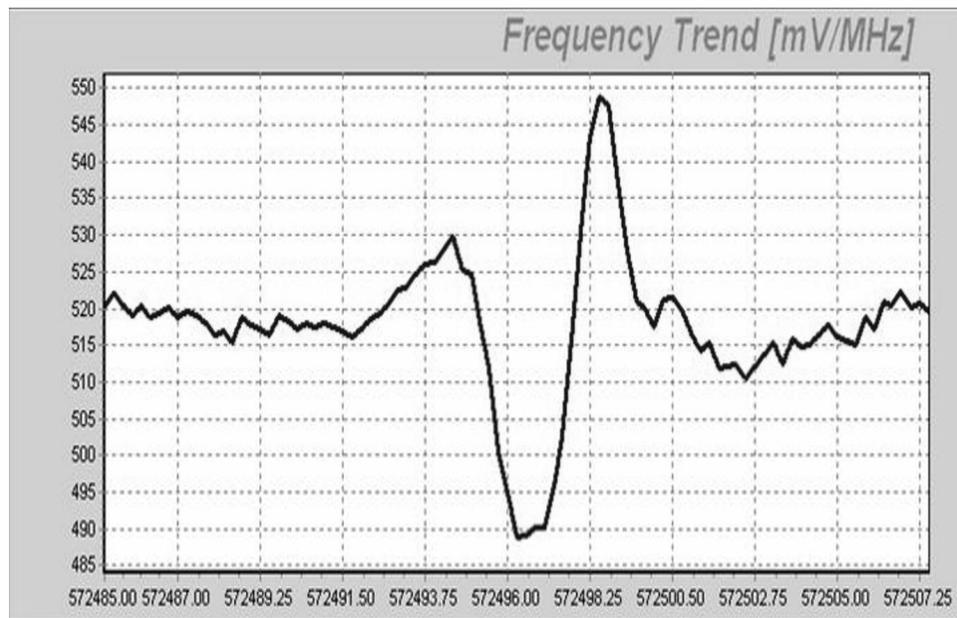


В.Л.Вакс, В.Ю.Балакирев, А.Н.Панин, С.И.Приползин, В.П.Кошелец,

О.С.Киселев

Разработка физических принципов построения и реализации спектрометра  
диапазона 500-700 GHz со сверхпроводниковым интегральным приемником

Рис.4.



В.Л.Вакс, В.Ю.Балакирев, А.Н.Панин, С.И.Приползин, В.П.Кошелец,  
О.С.Киселев

Разработка физических принципов построения и реализации спектрометра  
диапазона 500-700 GHz со сверхпроводниковым интегральным приемником

Рис.5.