"ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ" N 1, 2016 оглавление

УДК 535.343.4, 543.421/.422

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ГАЗА С ФАЗО-ДИФФУЗИОННЫМ ПОЛЕМ И КОГЕРЕНТНЫМ СИГНАЛОМ

Л. С. Ревин[1,2], В. Л. Вакс[1,2], В. П. Кошелец[3], H. B. Wang[4]

[1]Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского

[2]Институт физики микроструктур РАН

[3]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова (ИРЭ РАН)

[4]National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japan

Статья поступила в редакцию 18 января 2015 г.

Аннотация. В работе проведено экспериментальное исследование взаимодействия молекулярного газа с фазо-диффузионным полем и когерентным сигналом. В качестве шумового сигнала использовалась BiSrCaCuO ВТСП меза-структура, в качестве когерентного сигнала использовалась лампа обратной волны. В результате эксперимента показано, что воздействие шумового сигнала на молекулярный газ аналогично воздействию когерентного сигнала.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон частот, молекулярный газ, фазо-диффузионное поле, когерентный сигнал, меза-структура.

Abstract. An experimental study of the molecular gas interaction with phase diffusion field and a coherent signal was presented. The noise radiation source employed in the experiment was an oscillator based on the BiSrCaCuO HTS mesa structure. The coherent signal was produced by a backward-wave oscillator. The experiment shows that the effect of the noise signal on the molecular gas is similar to coherent one.

Key words: THz spectroscopy, molecular gas, phase-diffusion field, coherent signal, superconductor mesa-structure.

Введение

Взаимодействие молекулярного газа с когерентным полем приводит к наведению макроскопической поляризации молекул. По величине этого отклика с высокой точностью производится определение концентрации

исследуемых компонентов газовой смеси.

Альтернативой может стать применение в качестве источника излучения генератора шумового сигнала, обладающего широким спектром. Ранее было предсказано [1], что шумовой сигнал фазо-диффузионного поля может наводить макроскопическую поляризацию в системе, причем по величине сравнимую с поляризацией в случае когерентного поля. В качестве фазо-диффузионного сигнала рассматривался гармонический сигнал со случайной фазой (или частотой dφ/dt) описывающейся дельта-коррелированным гауссовским шумом:

$$E(t) = A\cos(\omega t+\varphi(t))),\ \ \varphi(t) \text{ – диффузионный процесс}$$

$$d\varphi(\mathrm{t}) / \mathrm{d}t = \gamma\xi(t),$$

$$<\xi(t_1)\ \xi(t_2)> = \delta(t_1 - t_2) \text{ – белый Гауссовый шум,}$$

$$\gamma \text{ - полоса шума.}$$

В этом случае можно говорить, что происходит расплывание фазы во времени, и спектр такого сигнала будет иметь лоренцеву форму линии (рис. 1.)

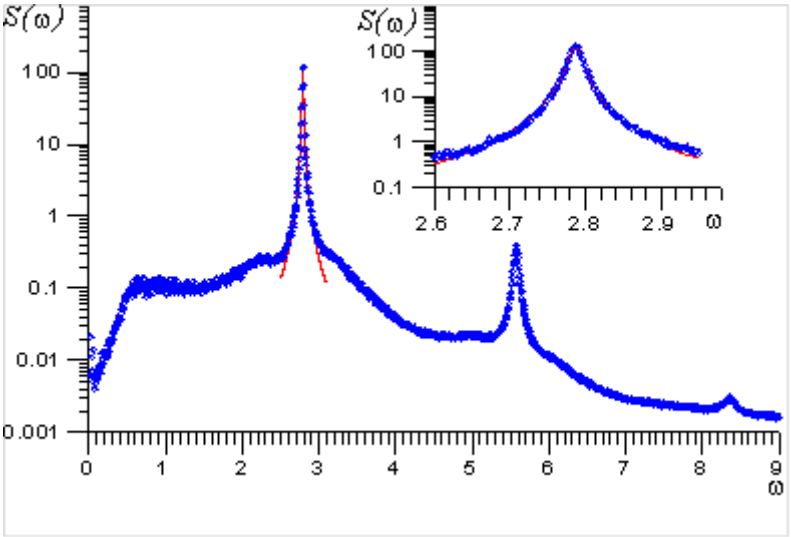

Рис. 1. Спектр фазо-диффузионного сигнала, рассчитанный численно

Целью данной работы было экспериментальное сравнение воздействия когерентного сигнала и фазо-диффузионного поля на молекулярный газ.

1. Описание эксперимента

Блок-схема эксперимента представлена на рисунке 2. В качестве источника фазо-диффузионного поля использовался купратный высокотемпературный сверхпроводник BiSrCaCuO (BSCCO) [2]. В качестве

источника когерентного сигнала использовалась лампа обратной волны (ЛОВ). В качестве молекулярного газа использовались пары 10% раствора аммиака. Исследуемая смесь напускалась в предварительно откаченную кювету посредством вакуумных кранов так, чтобы получить в объеме смесь необходимого давления. Эксперименты проводились на частоте поглощения аммиака 572.5 ГГц. В качестве детектора использовался сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП) [5-6], основанный на низкотемпературных джозефсоновских переходах.

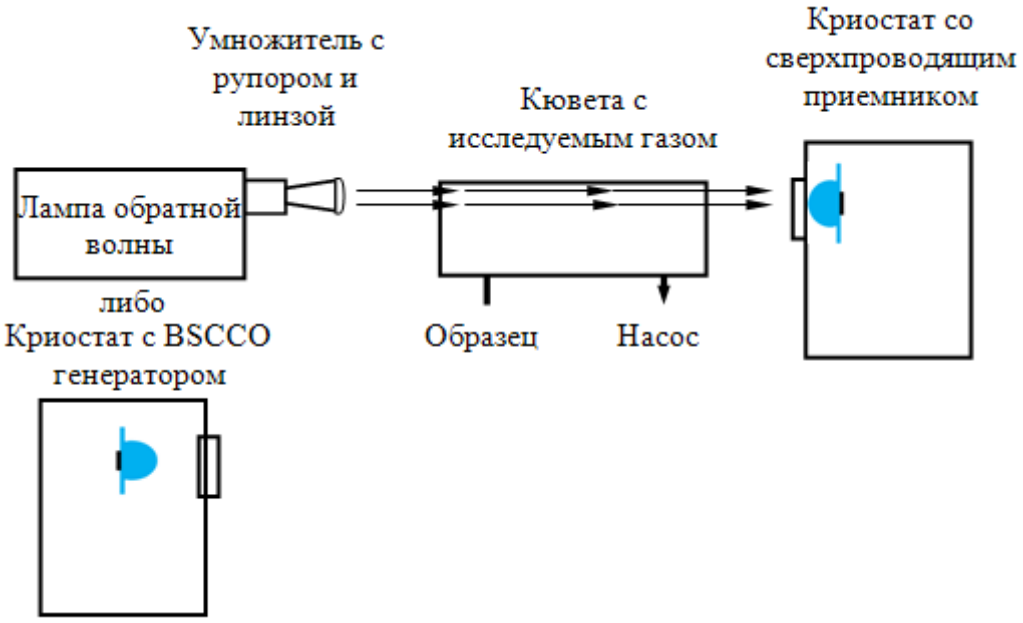

Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки

Структуры на основе купратных высокотемпературных сверхпроводников BSCCO выполнены в виде плоской одиночной структуры, в которых в направлении перпендикулярном кристаллическим слоям естественным образом формируются джозефсоновские переходы [3], рисунок 3. По сути, такая структура представляет собой слоистый «пирог» из последовательной цепочки джозефсоновских генераторов, при определенных условиях находящихся в режиме синхронизации.

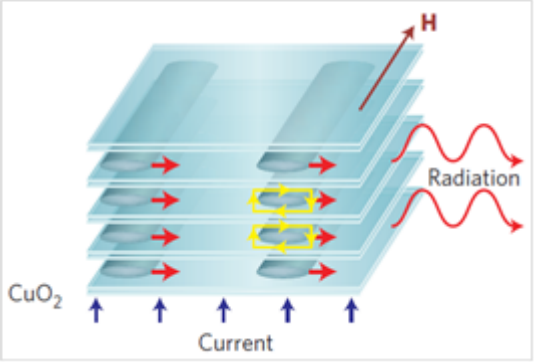

Рис. 3. Схематическое представление генерации в слоистых BSCCO меза-структурах

Рабочая область частот BSCCO находится в диапазоне 400-600 ГГц, а ширина линии меняется от десятков до нескольких сотен 200 МГц [4], типичная вольт-амперная характеристика представлена на рисунке 4. Структура BSCCO, помещенная на линзу, рисунок 5, находилась при гелиевых температурах, сигнал через окно криостата проходил сквозь ячейку с исследуемым газом.

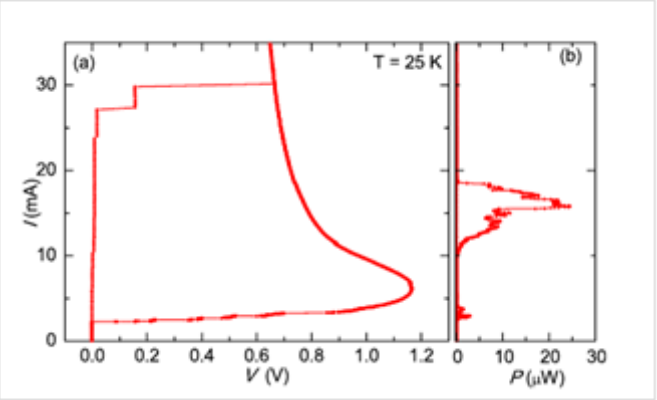

Рис. 4. Типичная вольт-амперная характеристика генератора и мощность излучения

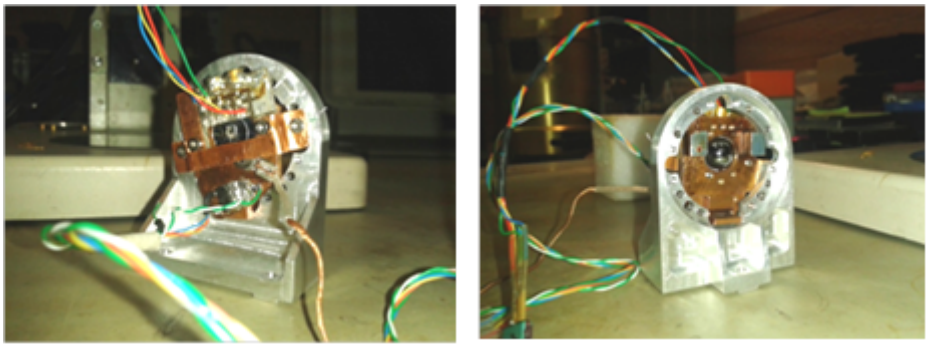

Рис. 5. Фото образца BSCCO, закрепленного на линзу

В качестве источника когерентного сигнала использовалась лампа обратной волны (ЛОВ) 120 – 160 ГГц частотного диапазона с мощностью излучения 10 мВт, рисунок 6. В качестве умножителя частоты использовалась полупроводниковая наноструктура, так называемая сверхрешетка - тонкая периодическая структура с симметричной вольт-амперной характеристикой. В результате диапазон выходных частот системы составлял 450 – 750 ГГц на 3, 4 и 5 гармониках сигнала ЛОВ. Для автоматического контроля частоты ЛОВ использовалась система фазовой автоподстройки частоты.

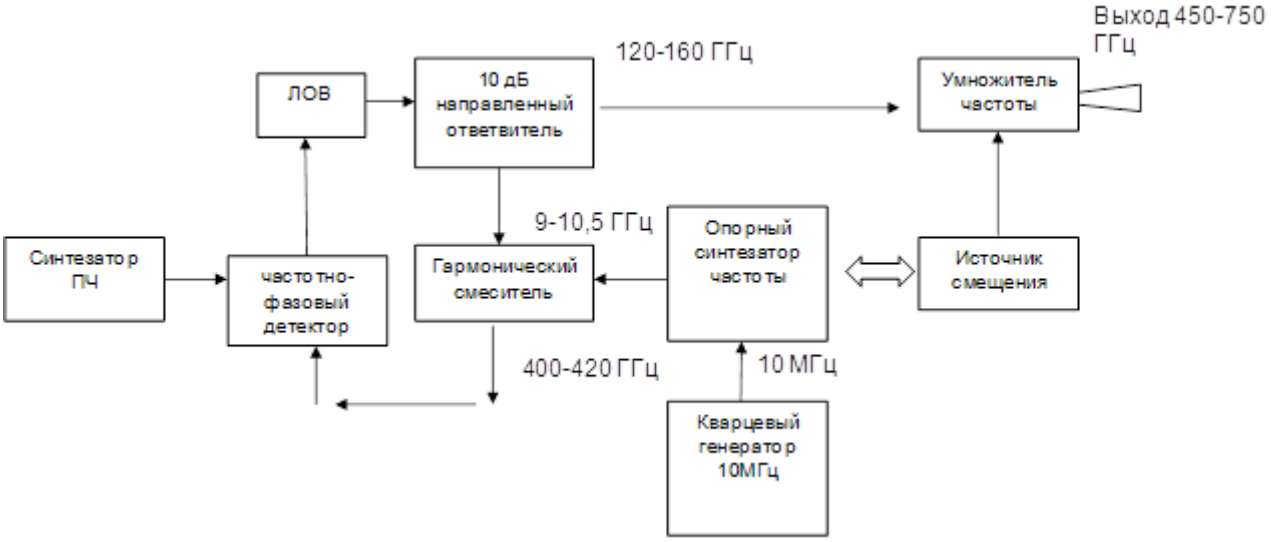

Рис. 6. Блок-схема источника на лампе обратной волны и сверхрешетке

Принципиальная схема сверхпроводникового интегрального приемника изображена на рис. 7.

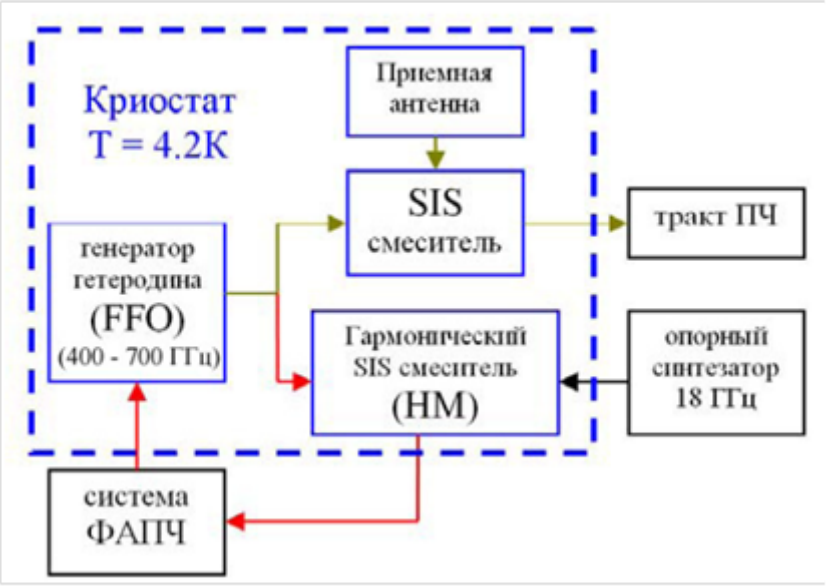

Рис. 7. Блок-схема интегрального сверхпроводникового приемника

На СИС (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник) – смеситель через приемную антенну поступает сигнал от внешнего источника и подается сигнал гетеродина от FFO (Flux-flow oscillator, генератор бегущих волн). После перемножения этих сигналов, сигнал промежуточной частоты (ПЧ) поступает на холодные и теплые усилители и выводится наружу, таким образом формируется сигнал на выходе приемника. Для стабилизации и уменьшения линии гетеродина используется второй смеситель – гармонический и система ФАПЧ. Для этого часть мощности FFO ответвляется на гармонический СИС – смеситель (HM), в котором

смешивается с ”m”-ой гармоникой опорного синтезатора (19-21 ГГц), давая сигнал второй промежуточной частоты fПЧ2 = ± (fFFO – m*fсинт). Этот сигнал используется системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Стабилизированная по фазе частота гетеродина в СИПе выбиралась таким образом, чтобы обеспечить качественный прием сигнала в полосе 4 - 8 ГГц. Фотография образца, смонтированного на держатель с линзой, представлена на рисунке 8.

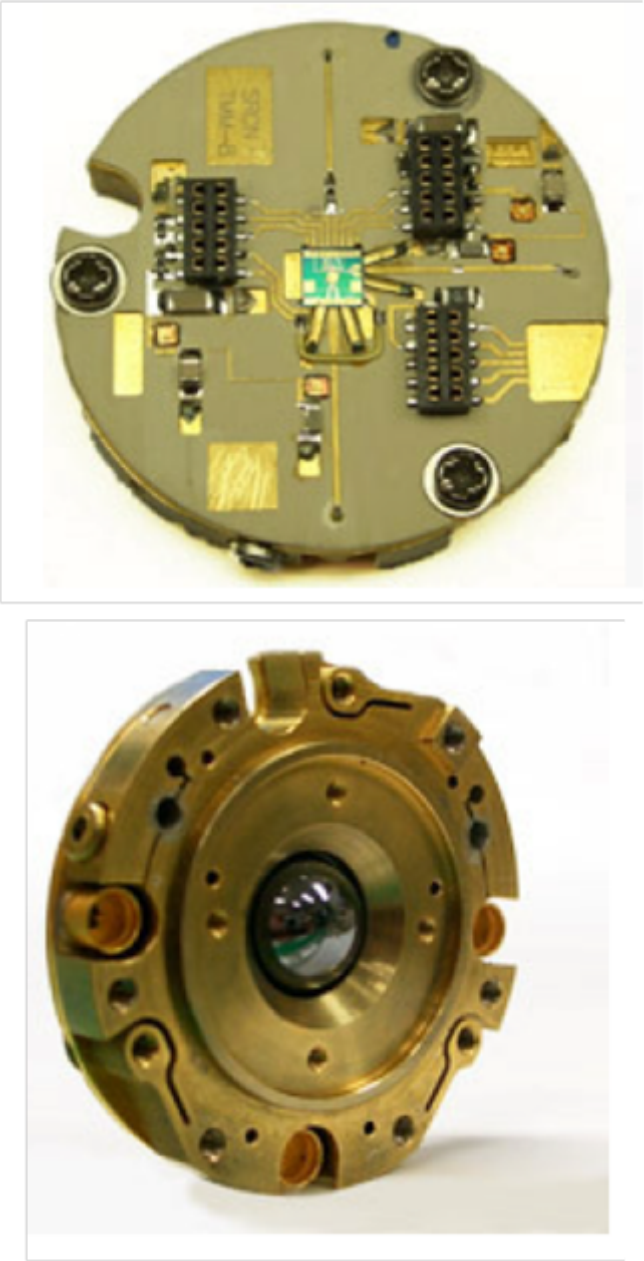

Рис. 8. Фотография образца сверхпроводникового приемника на линзе

2. Эксперимент 1. Источник фазо-диффузионного шума

Фотография экспериментальной установки с использованием генератора на основе меза-структуры представлена на рисунке 9.

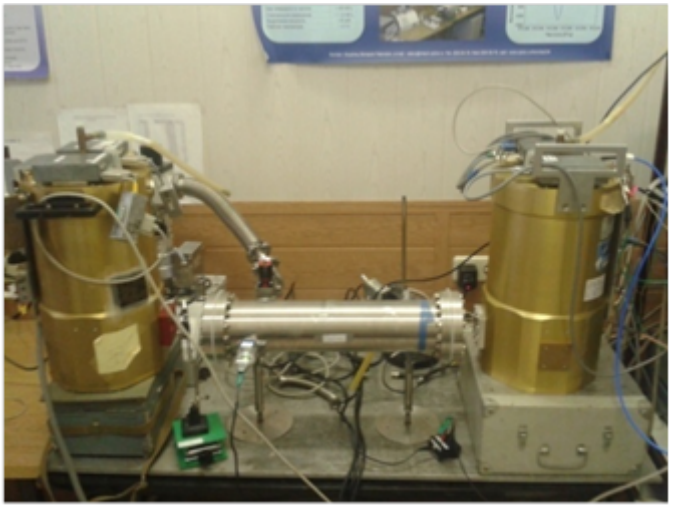

Рис. 9. Фотография экспериментального стенда для исследования фазо-диффузионного сигнала

Спектр сигнала BSCCO представлен на рисунке 10. Видно, что линия шумового генератора хорошо аппроксимируется лоренцевым профилем, то есть хорошо описывается моделью фазо-диффузионного поля. Анализ амплитудных флуктуаций источника показал высокую стабильность генерации (отклонение от среднего значения меньше 0.1%).

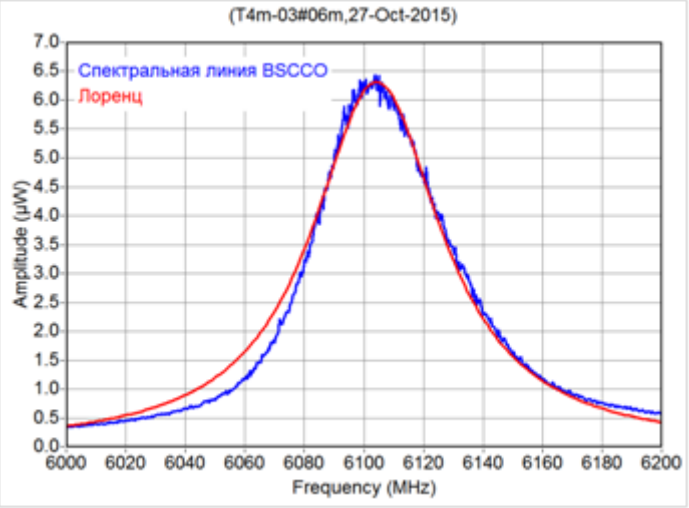

Рис. 10. Спектр сигнала BSCCO-генератора (частота ПЧ), аппроксимированный Лоренцевой кривой с шириной 50 МГц

В случае использования сигнала BSCCO с шириной линии излучения больше, чем линии поглощения газа, на спектральной характеристике регистрировалась просадка мощности (равная поглощенной в газовой среде мощности ΔP), рисунки 11, 12.

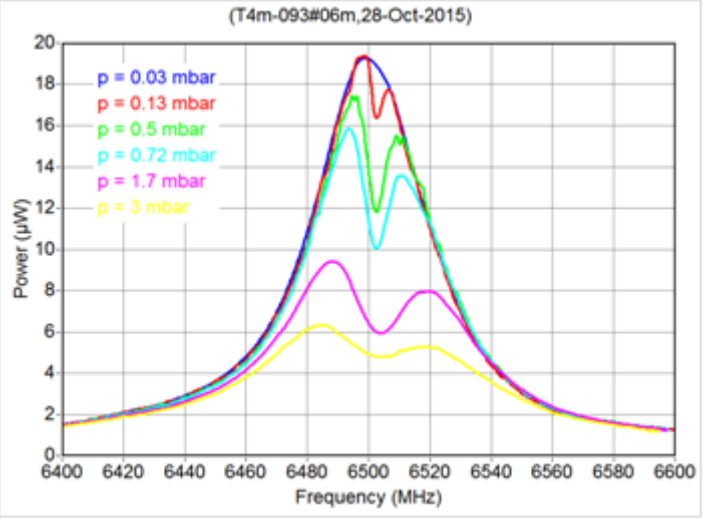

Рис. 11. Усредненный (N=100) спектр сигнала BSCCO-генератора (в полосе ПЧ) на фоне линии поглощения аммиака при различном давлении.

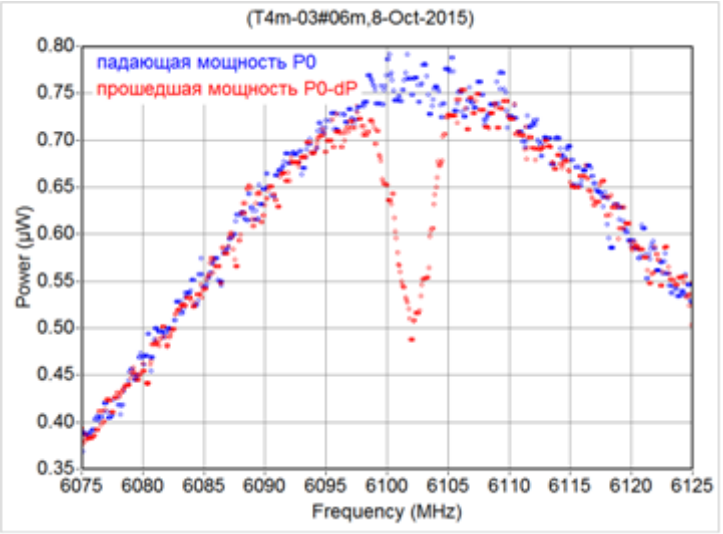

Рис. 12. Спектр сигнала BSCCO-генератора (частота ПЧ) на фоне линии поглощения аммиака при p = 0.08 mbar.

В результате были вычислены линии поглощения аммиака α:

$$\alpha = \Delta P / P_0, \qquad (1)$$

где P_0 – падающая мощность, измеренная в отсутствии газовой среды, ΔP – мощность, поглощенная в газовой среде. На рисунке 13 приведены линии поглощения аммиака для различного давления в ячейке.

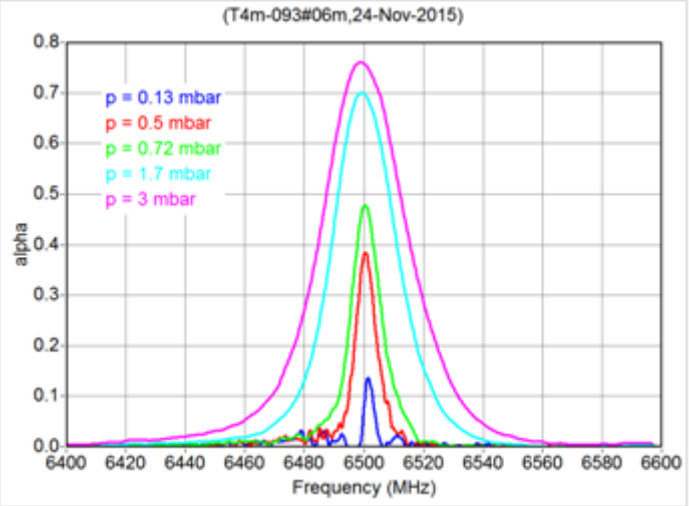

Рис. 13. Линия поглощения аммиака (частота ПЧ) в зависимости от давления в ячейке.

3. Эксперимент 2. Источник когерентного сигнала

Фотография экспериментальной установки с использованием генератора на основе лампы обратной волны представлена на рисунке 14.

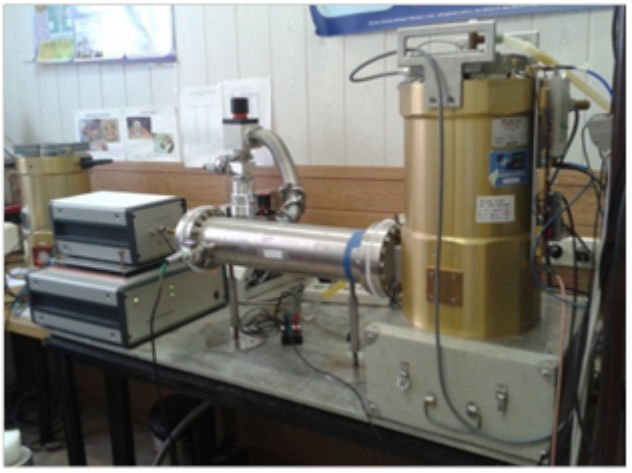

Рис. 14. Фотография экспериментального стенда для исследования когерентного источника

Линия сигнала ЛОВ (рисунок 15) имеет спектральные особенности, связанные с использованием частотной модуляции излучения с периодом модуляции, обеспечивающим нестационарное взаимодействие с линией поглощения аммиака. Для узкой линии ЛОВ (рисунок 16) необходимо было менять частоту излучения и регистрировать максимум прошедшей мощности от частоты.

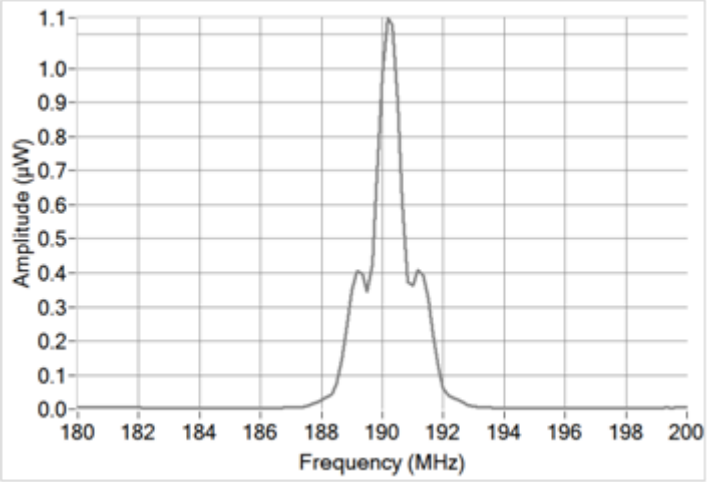

Рис. 15. Спектр сигнала ЛОВ, измеренный с помощью СИП; ширина линии, являющейся конволюцией сигналов ЛОВ и FFO, составляет 1.5 МГц

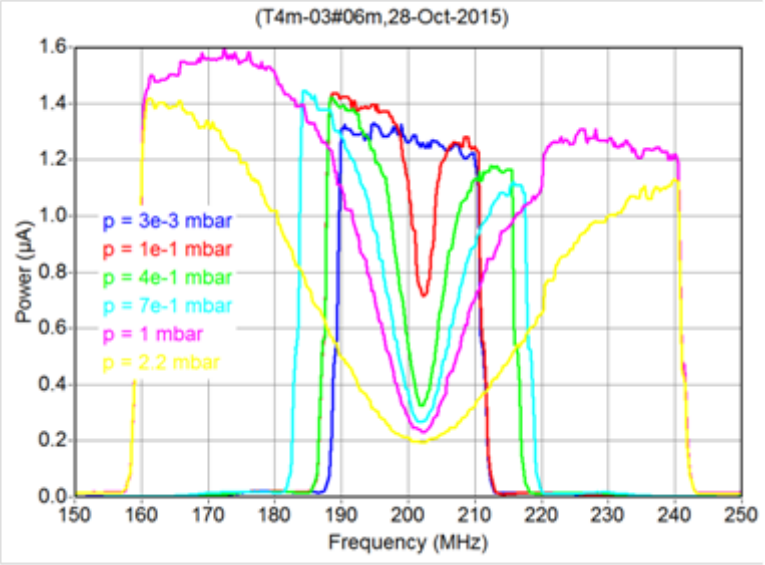

Рис. 16. Максимум спектральной линии ЛОВ на фоне линии поглощения аммиака при различном давлении.

Далее для нахождения поглощения аммиака использовались те же вычисления, что и в случае фазо-диффузионного шума, уравнение 1. На рисунке 17 приведено сравнение полученного поглощения с помощью двух различных источников.

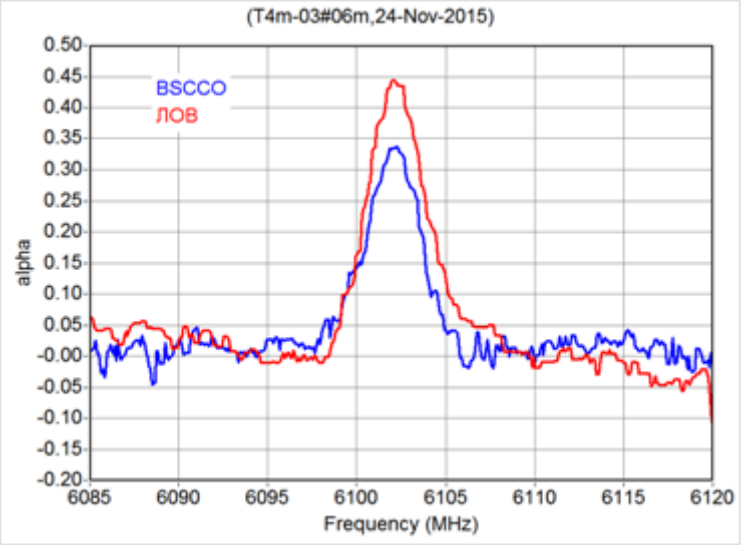

Рис. 17. Линия поглощения аммиака при давлении 0.08 mbar на частоте 572,5 ГГц (BSCCO и ЛОВ).

4. Результаты

На рисунке 18 представлена зависимость поглощения α в максимуме от давления. С учетом погрешности измерения зависимости коэффициента поглощения для случая использования когерентного сигнала и фазо-диффузионного поля достаточно близки. Возможными причинами наблюдаемого небольшого отклонения могут быть следующие факторы:

1. Недостаточная мощность, дошедшая до приемника после поглощения газом. В результате дя случая фазо-диффузионного поля падает отношение сигнал/шум и изменяемый коэффициент поглощения.

2. Согласно теории шумовой сигнал (в отличие от когерентного) осуществляет общий нагрев системы, Это приводит к уменьшению разности населенности между уровнями и, как следствие, к уменьшению коэффициента поглощения.

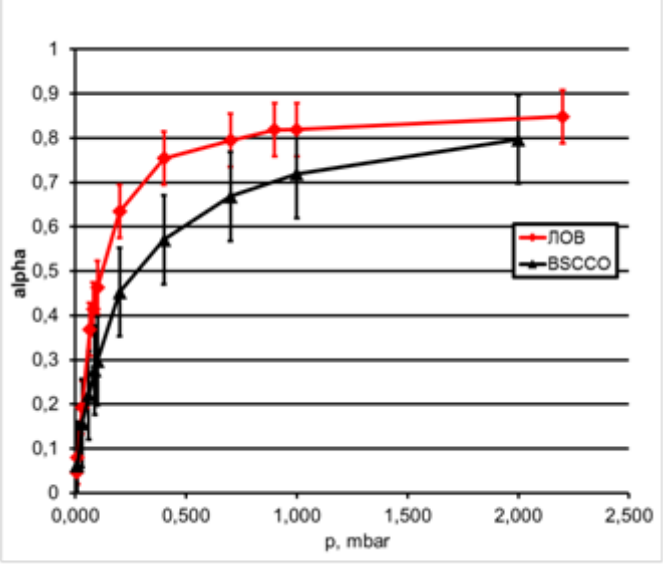

Рис. 18. Поглощение аммиака α при различном давлении (BSCCO и ЛОВ).

Заключение

Таким образом, в работе была исследована возможность использования фазо-диффузионного (ФД) шума для оценки поглощения газов, показано, что взаимодействие ФД сигнала с газом приводит к наведению макроскопической поляризации в квантовой системе по величине сравнимой с поляризацией в случае когерентного поля.

Исследования демонстрируют возможность создания новых методов спектроскопии поглощения на основе квазишумовых источников излучения в микроволновом и ТГц диапазонах частот.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 15-32-50850 и 14-02-91335).

Литература

1. Sobakinskaya E.A., Pankratov A.L., Vaks V.L. Dynamics of a quantum two-level system under the action of phase-diffusion field // Physics Letters A, v. 376, p. 265 – 269, 2012.
2. S.Guenon, M.Grunzweig, B.Gross et. al. Interaction of hot spots and terahertz waves in Bi2Sr2CaCu2O8 intrinsic Josephson junction stacks of various geometry// Phys. Rev. B, 2010. Vol. 82. P. 214506.
3. R. Kleiner. Filling the Terahertz Gap // Science, 2007, Vol. 318. P. 1254.
4. Mengyue Li et all. Linewidth dependence of coherent terahertz emission from $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime. // Phys. Rev. B 86, 060505(R), 2012.
5. V.P. Koshelets and S. Shitov. Integrated superconducting receivers// Supercond. Sci. Technol. 2000. Vol. 13. P. R53.
6. A.L.Pankratov, V.L.Vaks, V.P.Koshelets. Spectral properties of phase-locked flux flow oscillator//J. Appl. Phys. 102, 063912 (2007) pp. 063912-1 – 063912-5.