

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШУМОВОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КВАНТОВОЙ СИСТЕМЫ С ФАЗО-ДИФФУЗИОННЫМ ПОЛЕМ

Е.А.Собакинская^{1,2}, В.Л. Вакс^{1,2}, Н.В.Кинев³, В.П.Кошелец³, Н. Wang⁴

¹Институт физики микроструктур РАН, katja@ipmras.ru

²Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского,

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,

National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japan

В работе представлено экспериментальное изучение эффектов взаимодействия молекулярного газа (аммиак) с фазо-диффузионным полем. Источником шумового сигнала являлся джозефсоновский генератор на основе многослойной BSCCO структуры из высокотемпературных сверхпроводников. Генератор позволяет получить сигнал в диапазоне 500-600 ГГц с шириной линии от 20 до 100 МГц. В результате эксперимента продемонстрировано, что воздействие такого сигнала на газ приводит к наведению поляризации в квантовой системе как и в случае воздействия когерентного сигнала. Результаты расчета поглощения с помощью модели когерентного сигнала хорошо совпали с экспериментальными значениями.

Изучение взаимодействия квантовых систем (атомов и молекул) с различными стохастическими полями представляет интерес, как для фундаментальной, так и для прикладной науки. К настоящему времени изучены различные аспекты такого взаимодействия: флуктуации населенностей и изменения в спектре флуоресценции [1-3], динамика квантовой системы [4] и времена релаксации [5,6], электромагнитно-индуцированная прозрачность [7] и эффект Ауллера-Таунса под действием стохастических полей [8], приближение к тепловому равновесию для различных термостатов [9].

Одним из интересных примеров шумовых полей, существующих в природе, является фазо-диффузионное поле (ФДП). Оно представляет собой стохастический сигнал, амплитуда которого постоянна, а фаза, $\varphi(t)$, является Винер-Леви процессом (Броуновское движение с малым ускорением, [10]).

В нашей статье, посвященной исследованию воздействия ФДП на квантовые системы, [11] был предсказан эффект наведения макроскопической поляризации в квантовой системе на времена меньших времени корреляции шумового поля.

Целью данного исследования является экспериментальное изучение этого эффекта с помощью генератора на основе меза-структуры из сверхпроводникового высокотемпературного кристалла $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$.

Генератор на основе ВТСП купрата $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (BSCCO-генератора) представляет собой монокристаллическую структуру, выполненную в форме мезы («стопка», «плоская гора»), полученной методом травления кристалла фокусированным ионным пучком аргона [12]. В таком материале на кристаллическом уровне имеется система последовательно соединенных джозефсоновских переходов. Сверхпроводимость в таких структурах обусловлена «парными» слоями (би-слоями) CuO_2 толщиной порядка 0,3 нм. Эти би-слои разделены изолирующими слоями SrO и Bi_2O_3 , которые выступают в качестве барьера, что естественным образом формирует в кристаллической решетке ячейку в виде джозефсоновской структуры [13]. Подробное изучение работы такого генератора представлено в [14].

Блок-схема установки представлена на Рис.1. Регистрация сигнала осуществлялась посредством сверхпроводникового интегрального приемника (СИП), работающего в диапазоне 450 - 700 ГГц [15,16].

На первом этапе работы были изучены амплитудные и фазовые характеристики сигнала BSCCO-генератора. С этой целью проведены измерения флуктуаций амплитуды от времени (Рис.2) с помощью измерителя мощности. Результаты показали, что стандартное отклонение величины амплитуды от среднего значения не превышает 0,1%. Спектр флуктуаций фазы излучения генератора представлен на Рис.3.

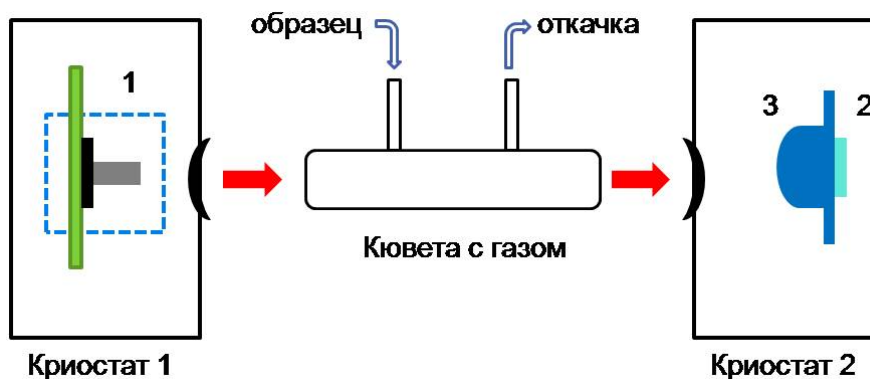


Рис.1. Блок-схема установки спектрометра:
1- BSCCO-генератор, 2- СИП, 3- кремниевая линза.

Спектр сигнала, аппроксимированный лоренцевым профилем, показан на Рис.4. Таким образом, проведенные измерения показали, что сигнал BSCCO-генератора с хорошей точностью может быть описан моделью ФДП.

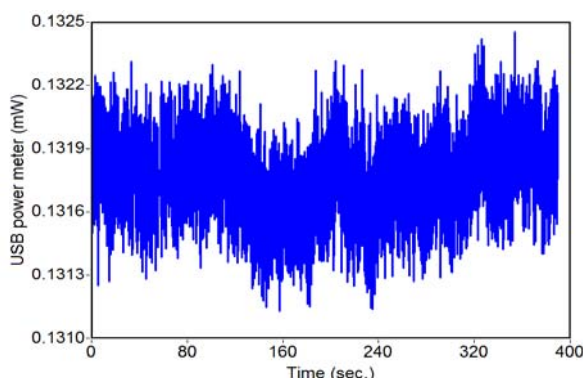


Рис.2. Флуктуации амплитуды сигнала в зависимости от времени.

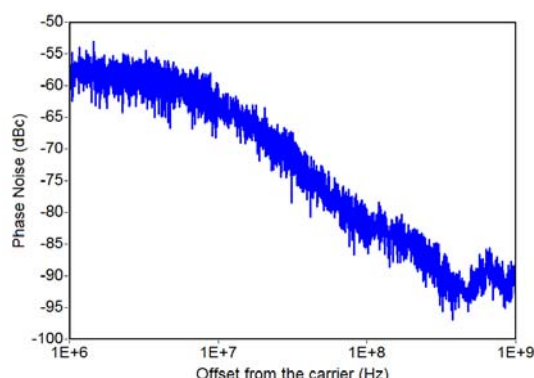


Рис.3. Спектр флуктуаций фазы сигнала.

На следующем этапе были проведены измерения линий поглощения аммиака (572.5 ГГц, $J=0 \rightarrow J=1, K=0$), находящегося в смеси с водой (10% раствор), при различных давлениях газа (Рис.5). Для этого центральная частота полосы BSCCO-генератора устанавливалась на частоте 572.5 ГГц. Стабилизированная по фазе частота гетеродина в СИПе выбиралась таким образом, чтобы обеспечить качественный прием сигнала от газа в полосе $4 - 8$ ГГц. Измеренные линии поглощения аммиака для двух давлений с аппроксимацией лоренцевым профилем показаны на Рис.6-7.

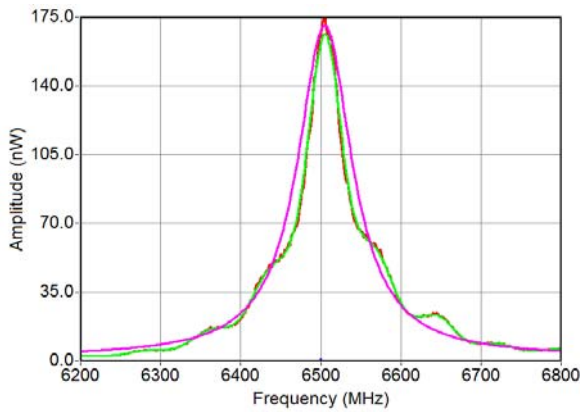


Рис.4. Спектр сигнала BSCCO-генератора, аппроксимированный Лоренцевой кривой с шириной 41 МГц.

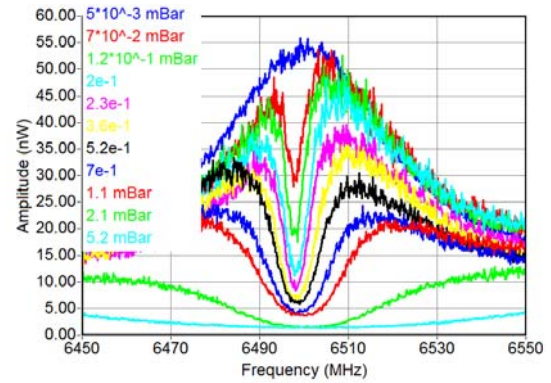


Рис.5. Линии поглощения аммиака на частоте 572,5 ГГц при различных давлениях.

Результаты измерений были использованы для вычисления α – отношения поглощенной мощности ΔP к падающей P_0 (171 нВт, см. Рис.4.):

$$\alpha = \frac{\Delta P}{P_0}$$

Величина α была так же рассчитана теоретически с использованием уравнения Бугера-Беера-Лапласа:

$$\alpha = 1 - e^{-\gamma l}$$

где γ - коэффициент поглощения газа, а l - длина газовой кюветы (50 см).

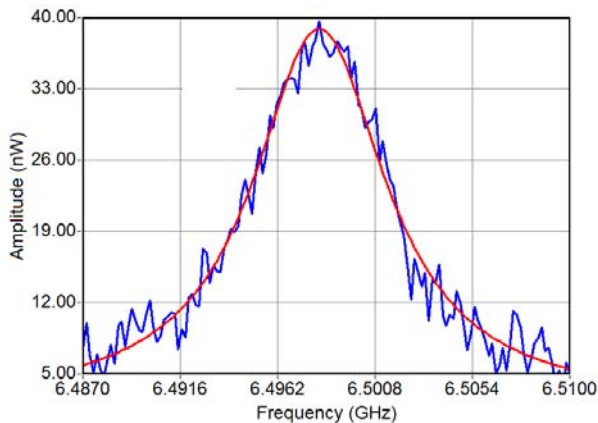


Рис.6. Линия поглощения аммиака при давлении 0.2 мБарр и аппроксимация Лоренцевой кривой с шириной 3,8 МГц.

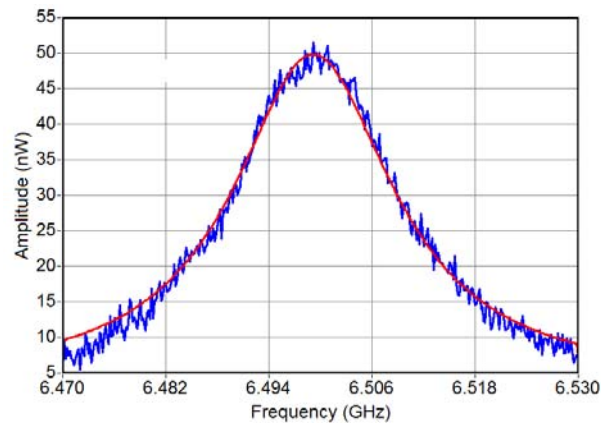


Рис.7. Линия поглощения аммиака при давлении 0.7 мБарр и аппроксимация Лоренцевой кривой с шириной 11,3 МГц.

Для вычисления γ использовалась модель когерентного поля, предложенная в работе [11]:

$$\gamma = \frac{4\pi\omega_0 \Delta N d_{12}^2}{c \hbar \tau} \frac{1}{\frac{1}{\tau^2} + \xi^2} \left[1 - e^{-\tau/c} (\cos \xi \tau_c - \xi \tau \sin \xi \tau_c) \right]$$

где ω_0 – резонансная частота, ΔN – разность населенностей, d_{12} – матричный элемент дипольного момента между уровнями резонансного перехода, ξ – Раби частота, а τ_c – время корреляции ФДП ($\tau_c=1/\Omega$, Ω – ширина полосы ФДП). Отметим, что малая мощность

генератора и высокие давления, используемые в эксперименте, не позволяют наблюдать эффект уменьшения времени релаксации газов, поэтому для τ использовалось значение $\Delta\omega^{-1}$, где $\Delta\omega$ – ширина линии поглощения аммиака, определенная из эксперимента. Разность населенностей ΔN рассчитывалась с использованием статического распределения по вращательно-колебательным уровням для симметричных волчков в соответствии с выражением [17,18]:

$$\Delta N = \frac{(2J+1)}{2} \exp\left(-BJ\frac{(J+1)\hbar}{kT}\right) \sqrt{\frac{B^2 C \hbar^2}{\pi(kT)^2}} \left[1 - \exp\left(\frac{-\hbar\omega_0}{kT}\right)\right] \rho_0$$

где ρ_0 – концентрация молекул аммиака, $T=300\text{K}$, $B=286$ ГГц, $C=189$ ГГц.

Графики зависимости величины α , определенной экспериментально и рассчитанной теоретически, представлены на Рис.8.

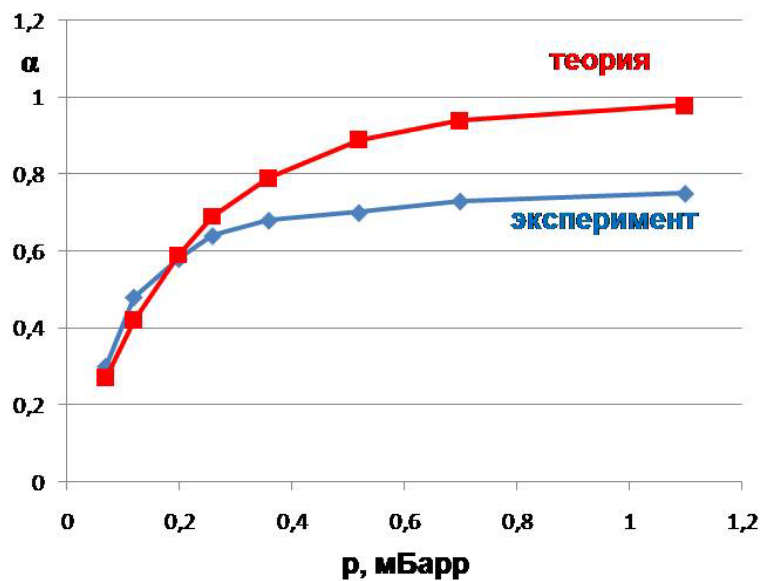


Рис.8. Значения α , полученные в эксперименте и рассчитанные теоретически в зависимости от величины давления.

Разница между экспериментальными и теоретическими значениями α не превышает 24%, что свидетельствует о справедливости предложенной модели: на малых временах, $t \ll t_c$, шумовое поле ведет себя как когерентный сигнал и наводит поляризацию в квантовой системе. Значение поляризации достигает максимума при $t \sim t_c$. Далее поляризация распадается под действием столкновений между молекулами.

Возможность наведения макроскопической поляризации в ансамбле квантовых систем позволяет использовать фазо-диффузионное поле для создания новых методов спектроскопии поглощения на основе квазишумовых источников излучения в микроволновом и ТГц диапазонах частот.

Работа выполнена при поддержке РФФИ: проекты TeraDec 047.018.005, NATO.EAP.SFPP 984068, Грантом Правительства Российской Федерации № 11.G34.31.0066

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Walser, H. Ritsch, P. Zoller, J. Cooper. Laser-noise-induced population fluctuations in two-level systems: Complex and real Gaussian driving fields // Phys. Rev. A 45 (1992) 468.

2. *M.H. Anderson, R.D. Jones, J. Cooper, S.J. Smith, D.S. Elliott, H. Ritsch, P. Zoller* . Observation of population fluctuations in two-level atoms driven by a phase diffusing field // *Phys. Rev. Lett.* 64 (1990) 1346.
3. *M.H. Anderson, R.D. Jones, J. Cooper, S.J. Smith, D.S. Elliott, H. Ritsch, P. Zoller* Variance and spectra of fluorescence-intensity fluctuations from two-level atoms in a phase-diffusing field // *Phys. Rev. A* 42 (1990) 6690.
4. *A.A. Budini*. Quantum systems subject to the action of classical stochastic fields // *Phys. Rev. A* 64 (2001) 052110.
5. *L. Andreozzi, C. Donati, M. Giordano, D. Laporini*. Longitudinal relaxation induced by colored noise // *Phys. Rev. E* 49 (1994) 3488.
6. *C. Donati, D. Laporini* . Relaxation induced by colored noise. II. Homogeneous and heterogeneous correlation loss // *Phys. Rev. E* 51 (1995) 903.
7. *A.G. Kofman* Electromagnetically induced transparency and evolution of a two-level system under a strong chaotic field // *Phys. Rev. A* 63 (2001) 033810.
8. *G. Li, H. Guo, G. Huang*. Autler–Townes spectrum of a three-level atom driven by coherent and stochastic fields // *Phys. Lett. A* 293 (2002) 116.
9. *K. Faid, R.F. Fox*. Stochastic theory of relaxation and approach to thermal equilibrium for phonon reservoirs // *Phys. Rev. A* 35 (1987) 2684.
10. *К.В.Гардинер*. Стохастические методы в естественных науках // Издательство: Мир. 1986.
11. *E.A. Sobakinskaya, A.L. Pankratov, V.L. Vaks*. Dynamics of a quantum two-level system under the action of phase-diffusion field // *Physics Letters A*. 2012. Vol. 376. P. 265–269.
12. *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.
13. *R. Kleiner*. Filling the Terahertz Gap // *Science*, 2007, Vol. 318. P. 1254.
14. *Н.В. Кинев, и др.* Спектральные характеристики генератора терагерцового излучения на основе меза-структуры Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} // *Радиофизика*, в печати.
15. *V.P. Koshelets and S. Shitov*. Integrated superconducting receivers// *Supercond. Sci. Technol.* 2000. Vol. 13. P. R53.
16. *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.
17. *У.Флайгер*, Строение и динамика молекул // Москва «Мир», т.2, 1982.
18. *Ч.Таунс, А.Шавлов*. Радиоспектроскопия // Изд. иностранной литературы, М., 1959.

Application of a noise generator based on Josephson flux flow oscillator for studying of interaction of quantum system with phase-diffusion field

The paper reports on experimental studying of interaction of molecular gas (ammonia) with phase-diffusion field. The noise signal generator is a Josephson flux flow oscillator, based on Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ intrinsic Josephson junction stacks. The generator provides radiation in the range 500-600GHz with linewidth 20-100 MHz. The experimental results demonstrate that the noise influence leads to inducing polarization in the quantum system. Moreover, the action can be described in the framework of a coherent signal model. Absorption coefficient, derived from the coherent field model, agrees very well with the one obtained from experimental data.