

УДК 535.343.4, 543.421/422

## ТГц СПЕКТРОМЕТР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ

В. Л. Вакс<sup>1,2</sup>, В. А. Анфертьев<sup>1,2</sup>, Г. Н. Гольцман<sup>3</sup>, И. В. Пентин<sup>3</sup>, И. В. Третьяков<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского

<sup>2</sup>Институт физики микроструктур РАН

<sup>3</sup>Московский педагогический государственный университет (МПГУ)

Статья поступила в редакцию 15 января 2016 г.

**Аннотация.** В работе рассмотрена возможность создания спектрометра высокого разрешения терагерцового (ТГц) диапазона, предназначенного для решения широкого круга задач. В предлагаемом варианте спектрометра в качестве источника излучения использованы синтезатор на базе генератора Ганна и умножитель частоты на основе полупроводниковой сверхрешетки (СР), а также NbN НЕВ-смеситель (Hot Electron Bolometer) в режиме прямого детектирования в качестве приемника ТГц излучения. Представлены экспериментально полученные результаты работы спектрометра: зарегистрированы линии поглощения H<sub>2</sub>O (1.92 ТГц, 17<sup>я</sup> гармоника синтезатора) и HDO (1.49 ТГц 13<sup>я</sup> гармоника синтезатора). В работе проанализированы полученные результаты и рассмотрены перспективы улучшения параметров спектрометра и дальнейших спектроскопических исследований.

**Ключевые слова:** терагерцовый диапазон частот, спектрометр высокого разрешения, полупроводниковая сверхрешетка, источник излучения, смеситель.

**Abstract:** The possibility of developing the high resolution terahertz (THz) spectrometer which is intended for solving of wide range of problems was considered. Gas spectrometer with using of the synthesizer based on Gunn generator and frequency multiplier with semiconductor superlattice (SL) as a radiation source and NbN hot electron bolometer (HEB) mixer in the mode of radiation detector as a

receiver system was proposed. Experimental results of spectrometer operation were presented: the H<sub>2</sub>O (1.92 THz, 17<sup>th</sup> harmonic) and HDO (1.49 THz, 13<sup>th</sup> harmonic) absorption lines were registered. The results performed were analyzed and further possibilities of improving the spectrometer characteristics as well as spectroscopy investigations were considered.

**Key words:** terahertz frequency range, high precise spectrometer, semiconductor superlattice, radiation source, mixer.

## Введение

На сегодняшний день для современных методов анализа, таких как терагерцевая спектроскопия высокого разрешения ТГц диапазон (100 ГГц – 10 ТГц) привлекателен тем, что в нем лежат наиболее интенсивные вращательные спектры многих легких молекул и низкочастотные колебательные спектры поглощения тяжёлых органических молекул. Регистрация спектров поглощения газов в ТГц частотном диапазоне с высоким (вплоть до кГц) разрешением является сложной задачей. Она требует как наличия стабильных ( $10^{-8}$ –  $10^{-9}$  от несущей частоты) и перестраиваемых в широком диапазоне источников, так и чувствительных и быстрых приемников ТГц излучения [1].

Традиционные подходы для создания электронных устройств, работающих в микроволновой части спектра, плохо применимы для создания приборов, работающих значительно выше нескольких сотен ГГц [2], потому что для увеличения частоты генерации и быстродействия требуются все более короткие времена пролета носителей в активной области, а также увеличивается роль паразитных параметров прибора. С другой стороны, традиционные оптические методы полупроводниковой электроники неприменимы для генерации ТГц излучения, поскольку используют межзонные переходы полупроводниковых материалов, энергии которых (порядка эВ) на порядки больше энергии кванта ТГц излучения (4 мэВ). Одним из путей решения проблемы генерации ТГц излучения является создание сложных гетероструктур, в которых осуществляются межподзонные переходы носителей на заданной частоте.

Полупроводниковые приборы, генерация ТГц излучения в которых основана на межподзонных переходах, получили название квантово-каскадных лазеров (ККЛ) [3]. ККЛ, работающие в ТГц (1-5ТГц) частотном диапазоне, принципиально требуют охлаждения до криогенных температур, иначе невозможно добиться инверсной заселенности между энергетическими подзонами в гетероструктуре.

Относительно простой и эффективный путь генерации частотно-стабильного ТГц излучения состоит в умножении частоты опорного синтезатора. В качестве умножителей традиционно применяются планарные полупроводниковые диоды с барьером Шоттки (ДБШ) [4-6]. Однако применение ДБШ на частотах свыше 1ТГц (как в качестве смесителей, так и умножителей частоты) затруднено, так как такие структуры имеют относительно высокую паразитную емкость и большие времена пролета носителей [7]. Более перспективными приборами для умножения частоты (а также использования их в качестве смесителей) являются устройства на основе квантовых полупроводниковых сверхрешеток (СР) [8,9]. СР представляет собой периодическую полупроводниковую структуру, состоящую из тонких слоев двух полупроводников, повторяющихся в одном направлении. Период по толщине выбирается меньше длины свободного пробега электронов, но больше постоянной кристаллической решетки. Возникающий в результате периодический потенциал, изменяет зонную структуру исходных полупроводников таким образом, что зона проводимости разбивается на совокупность энергетических минизон. Нелинейность тока СР обусловлена брэгговскими отражениями и процессами релаксации электронов в минизоне [10]. СР обладает гораздо меньшей паразитной емкостью (единицы фФ), нежели ДБШ. Нелинейность СР сохраняется вплоть до единиц ТГц [7]. Существуют хорошие перспективы использования СР в умножителях частоты на высоких номерах гармоник в качестве источника ТГц излучения [11]. Кроме того, умножитель на СР успешно можно использовать в качестве источника излучения в супергетеродинном приемнике на основе NbN НЕВ-смесителя [12].

## 1. Экспериментальная часть

В работе изучена возможность использования умножителя на основе СР в качестве источника ТГц излучения спектрометра высокого разрешения. С этой целью проведены тестовые измерения линий поглощения паров обычной и дейтерированной воды в диапазонах 1456–1495 ГГц, 1680–1725 ГГц, 1904–1955 ГГц с использованием спектрометра, где в качестве источника излучения был применен генератор гармоник на СР, а в качестве приемника ТГц излучения, NbN НЕВ-смеситель, работающий в режиме прямого детектора.

Используемая в эксперименте полупроводниковая СР GaAs/AlAs выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии и представляла собой последовательность 18 периодов чередующихся слоев GaAs и AlAs [13]. В качестве приемника использовался НЕВ, болометр на эффекте электронного разогрева, изготовленный из тонкой сверхпроводниковой пленки NbN [14]. Он характеризуется высокой чувствительностью (3000 В/Вт) и возможностью работать непосредственно в ТГц частотной области по сравнению с обычными детекторами на ДБШ, а также достаточно высоким быстродействием (50пс).

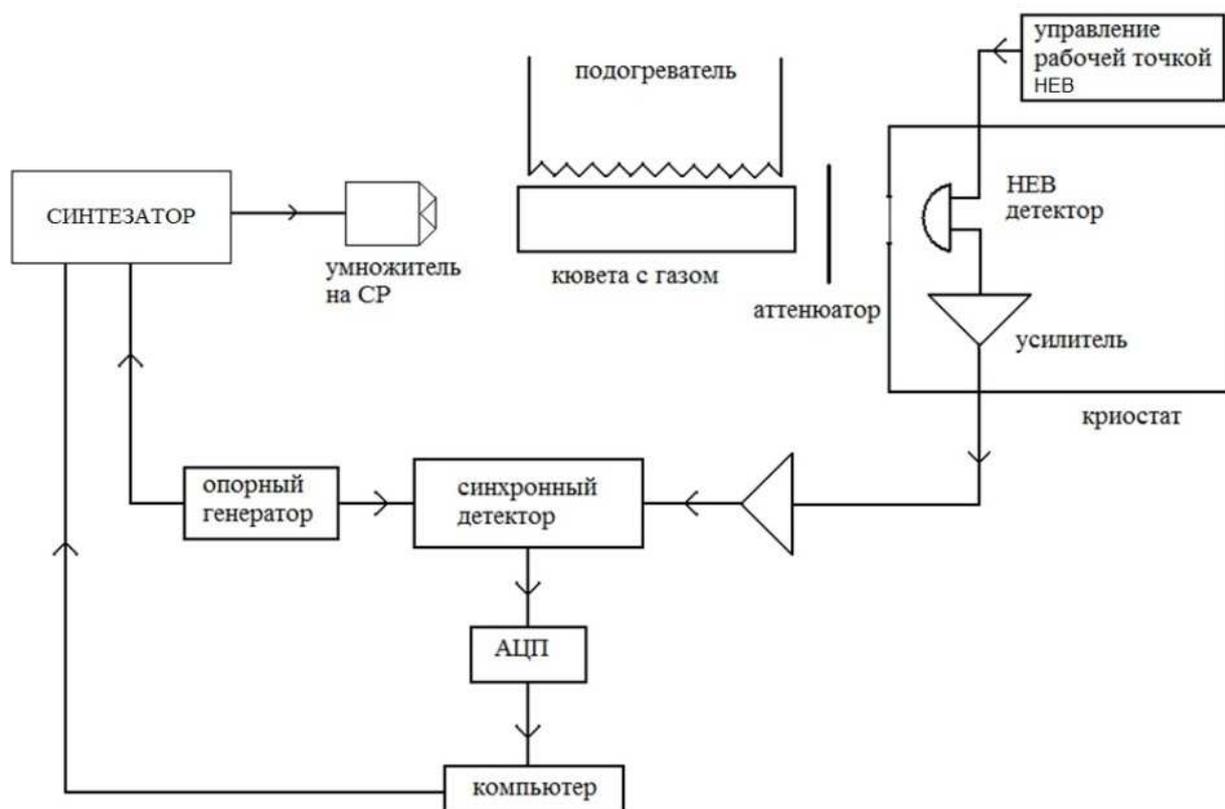


Рис. 1 Блок-схема экспериментальной установки

В качестве задающего генератора использовался синтезатор на основе генератора Ганна, с диапазоном генерации 112–115 ГГц (рис. 1). С синтезатора частотно-модулированное (ЧМ) излучение поступало на умножитель частоты на СР. Излучение с умножителя поступает в измерительную кювету с исследуемыми парами воды, частоты линий поглощения которых известны из каталога молекулярных спектров [15]. Исследуемое излучение из кюветы через окно оптического гелиевого криостата, заводилось на NbN НЕВ-смеситель, работающий в режиме прямого амплитудного детектора.

Рабочая точка болометра выставлялась с помощью специального блока управления. Предусмотрена возможность установки у входного окна криостата аттенюатора с целью ослабления входного сигнала. Сигнал с болометра поступал на криогенный усилитель и синхронный детектор и, далее, на АЦП и компьютер. Сигнал с опорного генератора частотой 1 МГц поступал на генератор Ганна и модулировал его излучение по частоте. В то же время, этот же сигнал являлся опорным для принимающего синхронного детектора. Компьютерная программа управляла частотой синтезатора и выводила зависимость напряжения, поступающего на АЦП с синхронного детектора, от времени. Измерительная кювета представляла собой кварцевую трубу диаметром 50 мм, длиной 1000 мм. Ячейка имела три патрубка, первый предназначен для подсоединения устройства напуска исследуемого вещества в измерительный объем, ко второму подключался измеритель давления, через третий осуществлялась откачка ячейки до рабочего давления  $10^{-3}$  Торр. Из специальной колбы напускались исследуемые пары до давления в кювете порядка  $10^{-2}$  Торр. Линия поглощения паров регистрировалась следующим образом. Синтезатор перестраивался по частоте с заданным шагом в требуемом частотном диапазоне. Так как сигнал имел частотную модуляцию, то при прохождении излучения через кювету с исследуемым веществом на выходе появляется амплитудная модуляция излучения, глубина которой пропорциональна крутизне линии. В результате строилась первая производная линии поглощения (рис. 2).

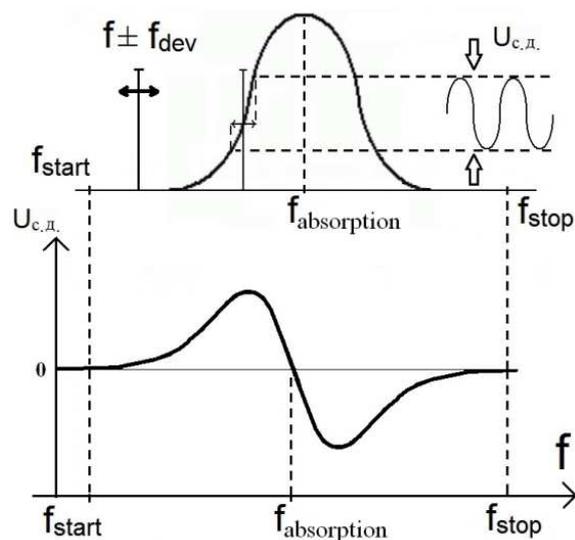


Рис. 2 Построение линии поглощения

## 2. Результаты и их обсуждение

В результате проведенных экспериментальных исследований удалось зарегистрировать следующие линии поглощения:  $\text{H}_2\text{O}$  – 1.72 ТГц (15я гармоника) (рис. 3),  $\text{H}_2\text{O}$  – 1.92 ТГц (17я гармоника) (рис. 4),  $\text{HDO}$  – 1.49 ТГц (13я гармоника) (рис. 5).

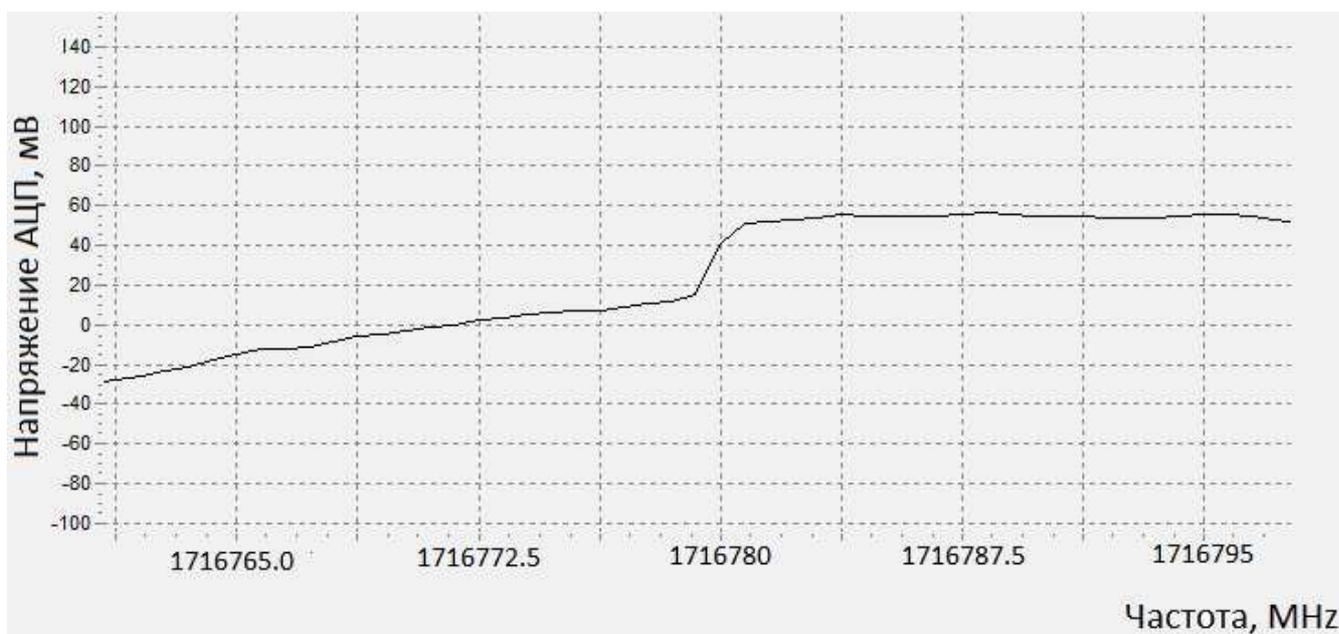


Рис. 3 Линия  $\text{H}_2\text{O}$  на частоте 1.72 ТГц

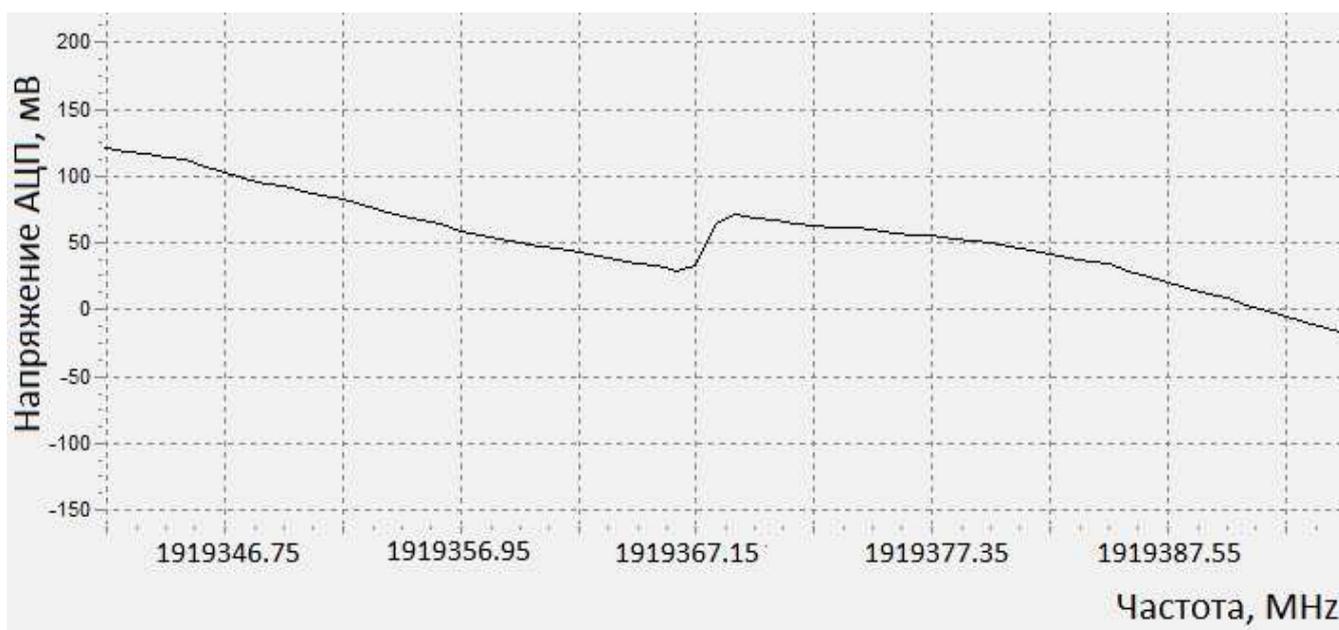
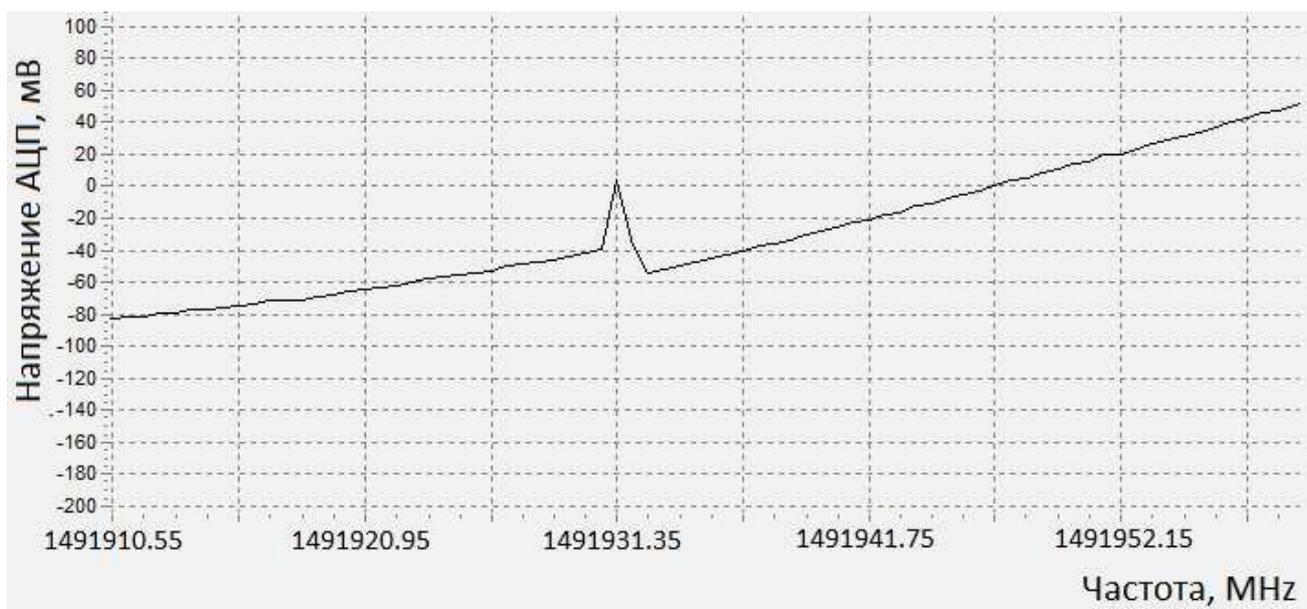
Рис. 4 Линия H<sub>2</sub>O на частоте 1.92 ТГц

Рис. 5 Линия HDO на частоте 1.49 ТГц

На более высоких частотах не удалось измерить аналитические линии воды по следующим причинам. Во-первых, с увеличением номера гармоники падает мощность излучения, что приводит к уменьшению сигнала с НЕВ-детектора и, как следствие, к ухудшению чувствительности спектрометра. Во-вторых, это отсутствие в эксперименте селекции гармоник. Так, в эксперименте, на НЕВ-детектор приходят сразу все гармоники, генерируемые

СР. Причём, гармоники низких номеров (3я, 5я гармоники) на порядки больше по мощности, чем использующиеся для спектроскопии гармоники высоких номеров. Это обстоятельство приводит к неизбежному ухудшению вольтваттной чувствительности НЕВ-детектора, ввиду выхода его за пределы динамического диапазона. На рис. 6 представлен график измерения линии поглощения НДО на частоте 1.49 ТГц без аттенюатора для излучения СР и с аттенюатором. Результаты сравнения показывают, что в случае использования аттенюатора регистрируемая линия поглощения больше по амплитуде, чем без него, хотя аттенюатор ослабляет все гармоники излучения СР.

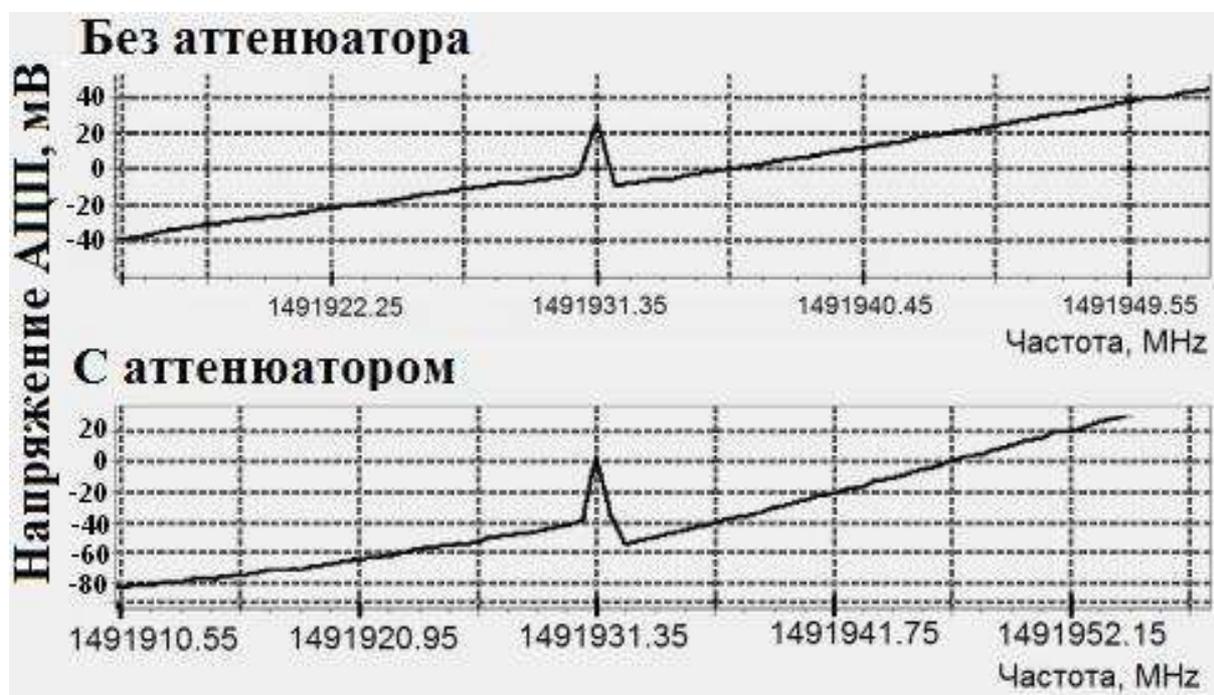


Рис. 6. Линия поглощения НДО на частоте 1.49 ТГц без аттенюатора для излучения СР и с аттенюатором

Дальнейшее направление работы будет связано с увеличением чувствительности по коэффициенту поглощения и разрешению по частоте спектрометра. Для достижения этих целей необходимо уменьшить шаг перестройки по частоте синтезатора и осуществить селекцию гармоник СР. Последнюю можно осуществить либо с помощью сеточных полосовых

фильтров, либо при использовании волноводной камеры для СР, обладающей большей частотой среза выходного излучения.

### **Заключение**

Таким образом, в результате проведенных исследований показана возможность применения генератора гармоник на СР в качестве источника и болометра на горячих электронах в качестве приемника излучения для ТГц спектрометра высокого разрешения. Были измерены линии поглощения обычной и дейтерированной воды в ТГц диапазоне частот. Намечены перспективы дальнейшего улучшения характеристик спектрометра.

Работа выполнена в рамках госзадания 2014/134, проект 1822, а также Гранта Правительства Российской Федерации № 11.G34.31.0066.

### **Литература**

1. Vaks V. High-Precise Spectrometry of the Terahertz Frequency Range: The Methods, Approaches and Applications // J. of IR, MM and THz Waves, vol.33 (1), p. 43-53, 2012.
2. Chamberlain J.M., Miles R.E., Collins C.E. and Steenson D.P. New Directions in Terahertz Technology / ed. J.M.Chamberlain and R.E.Miles (NATO ASI Series, Kluwer), 1997.
3. Williams B. Terahertz quantum-cascade lasers // Nature photonics. vol.1, P.517-525, 2007
4. F. Lewen, R. Gendriesh, I. Pak, et al. Phase locked backward wave oscillator pulsed beam spectrometer in the submillimeter wave range // Rev. Sci. Instrum., vol. 69, p.32, 1998.
5. F. Maiwald, F. Lewen, V. Ahrens, et al. Pure Rotational Spectrum of HCN in the Terahertz Region: Use of a New Planar Schottky Diode Multiplier // J. Mol. Spectrosc., vol. 202 (1), p. 166, 2000.
6. C.-I. Lin, A. Vogt, M. Rodriguez-Gironéz, et al. Annual Report // Technische Universitaet Darmstadt, 1998, p. 33.

7. Д.Г. Павельев, Н.В. Демарина, Ю.И. Кошуринов и др. Характеристики планарных диодов терагерцового диапазона частот на основе сильно легированных GaAs/AlAs – сверхрешеток // ФТП, т. 38, вып. 9, с. 1141-1146, 2004.
8. E. Schomburg, K. Hofbeck, R. Scheuerer, et al. Control of the dipole domain propagation in a GaAs/AlAs superlattice with a high-frequency field // Phys. Rev. B, vol. 65 (15), 155320, 2002.
9. L. Esaki, R. Tsu. Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors // IBM J. Res. and Dev., vol. 14, p. 61, 1970.
10. Романов Ю.А., Романова Ю.Ю. Блоховские колебания в сверхрешетках. Проблема терагерцового генератора // ФТП, т. 39, вып. 1, с. 162-170, 2005.
11. Павельев Д.Г., Кошуринов Ю.И., Иванов А.С. и др. Экспериментальное исследование умножителей частоты на полупроводниковых сверхрешетках в терагерцовом диапазоне частот // ФТП, т. 46, вып. 1, с. 125-129, 2012.
12. Пентин И.В., Смирнов А.В., Рябчун С.А. и др. Полупроводниковая сверхрешетка - твердотельный терагерцовый гетеродинный источник для электронно-разогревного NbN-смесителя // ЖТФ, т. 82, вып. 7, с. 75-78, 2012.
13. Вакс В.Л., Панин А.Н., Басов С.А. и др. Нестационарная спектроскопия диапазона частот 1-2,5 ТГц на твердотельных устройствах // Изв. Вузов. Радиофизика, т. 52, №7, с. 569-575, 2009.
14. Tretyakov I., Ryabchun S., Finkel M. et. al. Low noise and wide bandwidth of NbN hot-electron bolometer mixers // Appl. Phys. Lett., vol. 98, p. 033507, 2011.
15. JPL Catalog. // [Электронный ресурс]. URL: <http://spec.jpl.nasa.gov/ftp/pub/catalog/catform.html>