

УДК 535.34 621.314.26 538.945

**ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ
ТГц ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА**© 2014 г. **В.А. Анфертьев,¹ В.Л. Вакс,² И.В. Пентин,³ Г.Н. Гольцман,³
С.В. Селиверстов,³ М.И. Финкель,³ С.А. Рябчун,³ И.В. Третьяков³**¹ Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского² Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород³ Московский педагогический государственный университет

anfertev-va@rambler.ru

Поступила в редакцию 25.09.2013

Рассмотрена возможность создания спектрометра высокого разрешения терагерцевого (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 NbN НЕВ-смеситель (Hot Electron Bolometer) в режиме прямого детектирования – в качестве приемника ТГц излучения. Представлены экспериментально полученные результаты работы спектрометра: зарегистрированы линии поглощения H₂O (1.92 ТГц, 17-я гармоника синтезатора) и HDO (1.49 ТГц, 13-я гармоника синтезатора). Проанализированы полученные результаты и рассмотрены перспективы улучшения параметров спектрометра и дальнейших спектроскопических исследований.

Ключевые слова: ТГц спектроскопия высокого разрешения, полупроводниковая сверхрешетка, сверхпроводимость, сверхпроводниковый NbN болометр на горячих электронах, молекулярная газовая спектроскопия.

Введение

На сегодняшний день актуальной задачей в экологии (мониторинг загрязнений атмосферы), медицине (неинвазивная медицинская диагностика), высоких технологиях (обнаружение микропримесей в высокочистых газах, контроль технологических процессов), безопасности (обнаружение взрывчатых веществ) является развитие бесконтактных неразрушающих методов анализа параметров среды. Одним из таких методов является молекулярная спектроскопия высокого разрешения, которая позволяет с высокой чувствительностью анализировать состав многокомпонентных газовых смесей. Для аналитической спектроскопии 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 приемников ТГц излучения [1].

Проблема создания эффективных широкополосных источников ТГц излучения связана с тем, что в данном диапазоне плохо применимы хорошо разработанные методы генерации излучений соседних диапазонов. Так, со стороны коротковолновой области ТГц диапазона при комнатной температуре не удается достичь долговременной и устойчивой инверсной заселенности уровней, как это реализуется в оптических генераторах (лазерах). По этой причине квантово-каскадные лазеры способны генерировать в ТГц области частот только лишь при охлаждении до температуры жидкого азота и ниже. Со стороны длинноволновой области верхний предел частоты излучения задается временем пролета электронов в приборе, как, например, в лампах обратной волны [2]. Это приводит к необходимости применения в ограниченном объеме пространства весьма сильных электрических и магнитных полей для возникновения генерации на ТГц частотах.

Одним из перспективных методов получения сигналов в ТГц частотном диапазоне является применение умножителей частоты опорного генератора. При подаче сигнала с опорного низкочастотного генератора на нелинейный элемент спектр излучения на выходе умножителя кроме основной частоты содержит высшие гармоники. В качестве умножителей, традици-

онно используются диоды с барьером Шоттки (ДБШ). Основным недостатком этих элементов является относительно высокая паразитная емкость, что ограничивает их использование для генерации гармоник на частотах свыше 1 ТГц. Более перспективным является умножение частоты с использованием полупроводниковой СР [3]. 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 [4]. СР обладает гораздо меньшей паразитной емкостью (единицы фФ), нежели ДБШ. Сильная нелинейность (излом вольтамперной характеристики) СР сохраняется вплоть до единиц ТГц [5]. Существуют хорошие перспективы использования СР в умножителях частоты на высоких номерах гармоник в качестве источника ТГц излучения [6]. Кроме того, умножитель на СР можно успешно использовать в качестве источника излучения в супергетеродинном приемнике на основе NbN НЕВ-смесителя [2]. Построение гетеродинного приемника ТГц диапазона на основе NbN НЕВ-смесителя, где в качестве твердотельного гене-

ратора гетеродина может быть применена охлаждаемая полупроводниковая СР, открывает новые возможности в создании высокочувствительных инструментов высокого разрешения, направленных на решение задач ТГц спектроскопии, локации, радиоастрономии, систем безопасности.

Экспериментальная часть

В нашей работе была изучена возможность использования СР в качестве источника ТГц излучения широкодиапазонного спектрометра высокого разрешения. С этой целью были 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 была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии и представляла собой последовательность 18 периодов чередующихся слоев GaAs и AlAs [7]. В качестве приемника использовался НЕВ (болومتر на эффекте электронного разогрева), изготовленный из тонкой сверхпроводниковой пленки NbN [8]. Он характеризуется высокой чувствительностью (3000 В/Вт) и возможностью работать непосредственно в ТГц частотной области в отличие от обычных детекторов на ДБШ, а так-

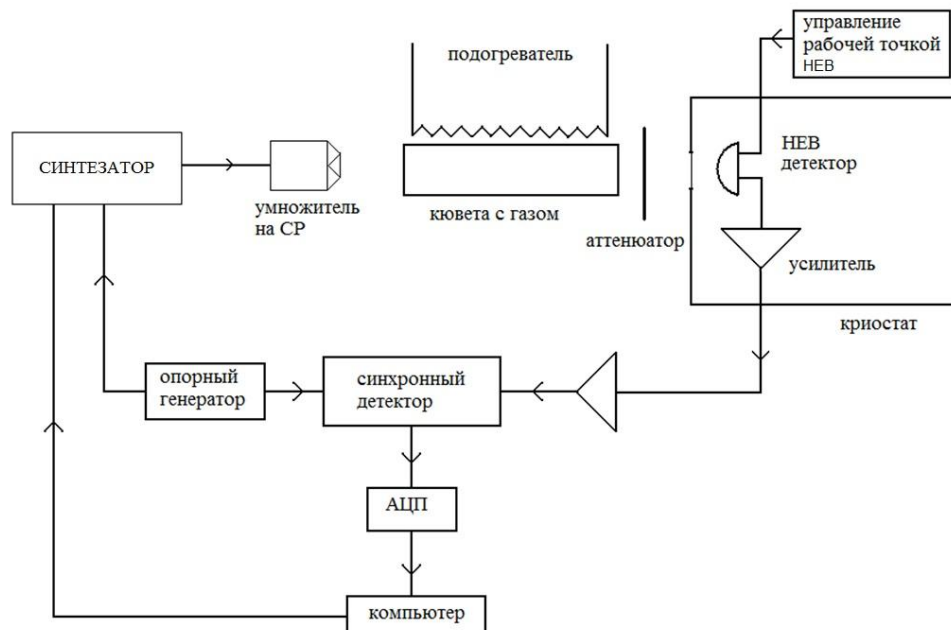


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

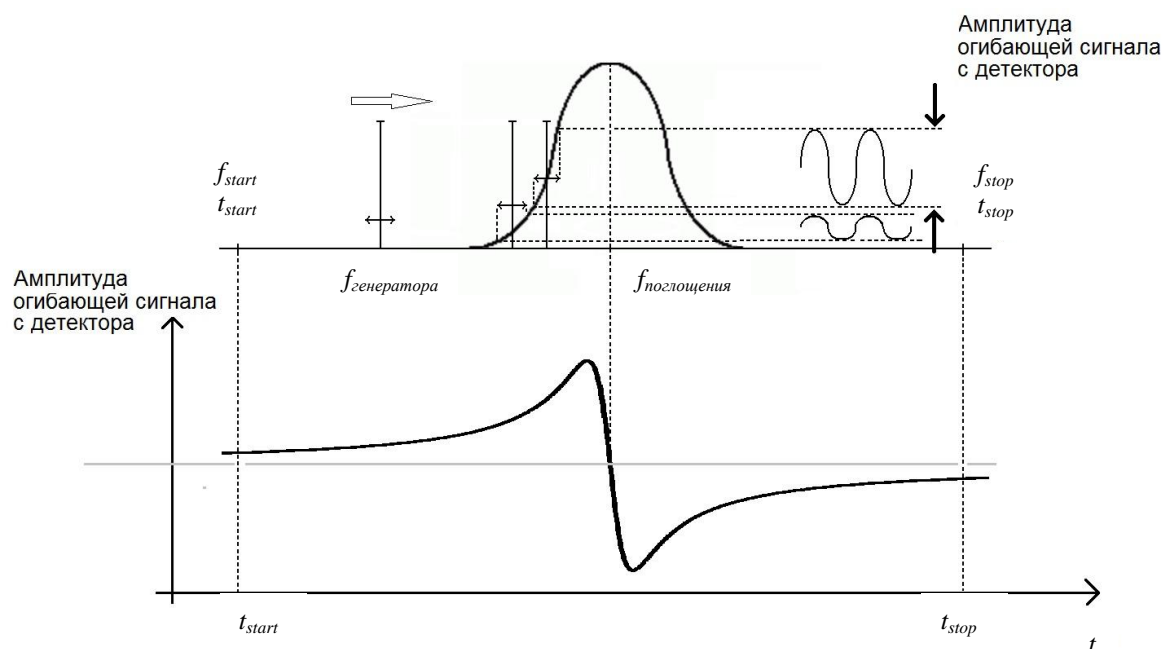


Рис. 2. Регистрация линии поглощения

же достаточно высоким быстродействием (50 пс). В качестве задающего генератора использовался синтезатор на основе генератора Ганна с диапазоном генерации 112–115 ГГц (рис. 1) [1]. С синтезатора частотно-модулированное (ЧМ) излучение поступало на умножитель частоты на СВ. Излучение с умножителя поступает в измерительную кювету с исследуемыми парами воды, частоты линий поглощения которых известны из каталога молекулярных спектров [9]. 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 ис-

следуемого 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 появлялась амплитудная модуляция излучения, глубина которой пропорциональна крутизне линии. Максимум сигнала с синхронного детектора соответствовал максимуму крутизны линии, на пике линии он равен нулю (относительно фонового уровня, который зависит от частотной характеристики тракта). При установке несущей частоты ЧМ сигнала синтезатора на падающий участок линии сигнал с синхронного детектора менял знак относительно фонового уровня, так как изменялась фаза огибающей амплитудно-модулированного сигнала относительно опорного. В результате строилась первая производная линии поглощения (рис. 2).

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных экспериментальных исследований удалось зарегистрировать следующие линии поглощения: H_2O – 1.72 ТГц (15-я гармоника) (рис. 3), H_2O – 1.92 ТГц (17-я

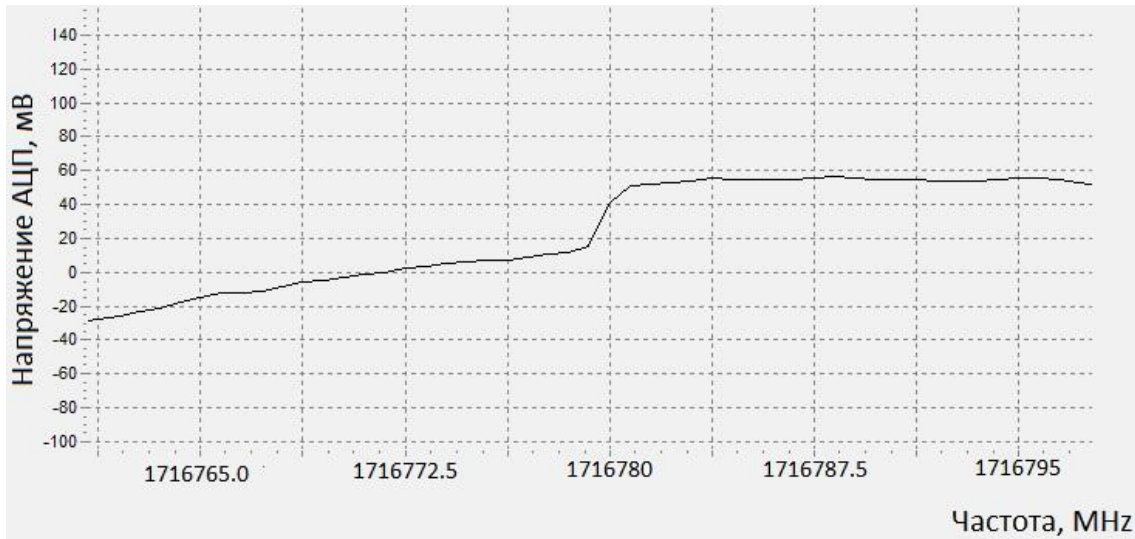
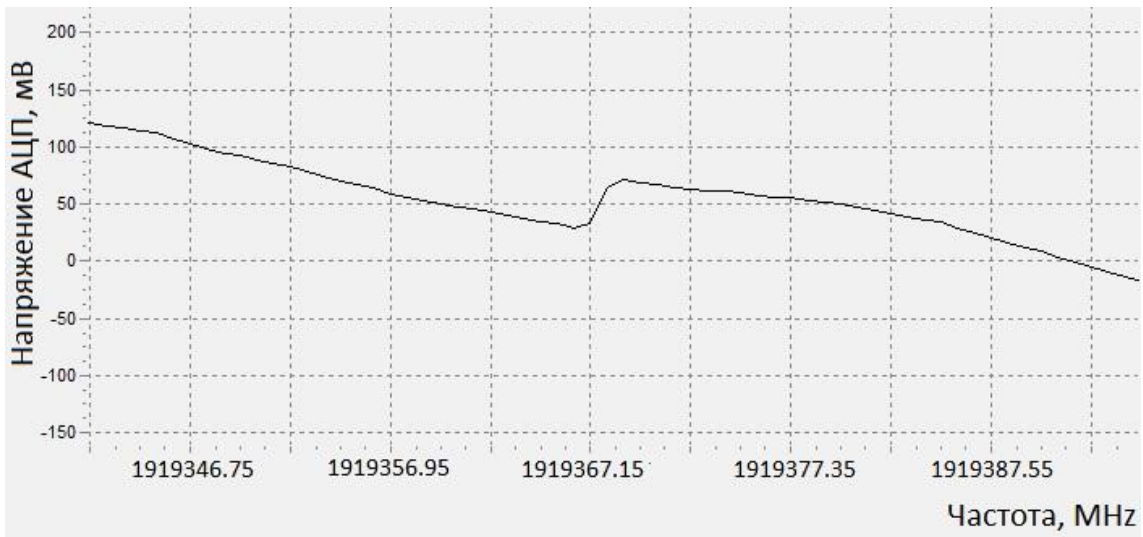
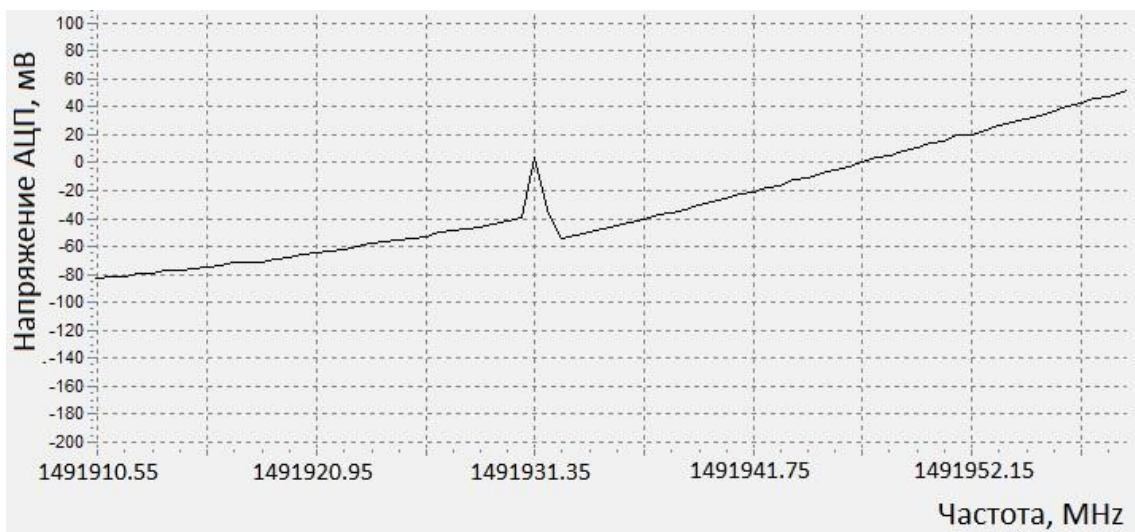
Рис. 3. Запись участка спектра поглощения H_2O – 1.72 ТГц (15-я гармоника)Рис. 4. Запись участка спектра поглощения H_2O – 1.92 ТГц (17-я гармоника)Рис. 5. Запись участка спектра поглощения HDO – 1.49 ТГц (13-я гармоника)



Рис. 6. Запись участка спектра поглощения HDO 1.49 ТГц при разных условиях эксперимента

гармоника) (рис. 4), HDO – 1.49 ТГц (13-я гармоника) (рис. 5).

Помимо линии поглощения газа присутствует паразитная зависимость переданной мощности от частоты, из-за которой существует ненулевой сигнал при отсутствии линии поглощения газа.

На более высоких частотах не удалось измерить аналитические линии воды по следующим причинам. Во-первых, с увеличением частоты увеличивается номер гармоники излучения, на которой должно быть зарегистрировано изменение мощности выходного излучения. С увеличением гармоники увеличиваются шаг по частоте и девиация частоты ЧМ сигнала. Для высоких номеров гармоник в нашем эксперименте точность перестройки синтезатора недостаточна (шаг по частоте синтезатора составлял 50 кГц). Для 17-й гармоники она составляет 0.85 МГц, что соответствует порядку ширины линии поглощения исследуемых паров (около 1 МГц) при оптимальных условиях эксперимента. Чтобы зарегистрировать линию поглощения, приходилось поднимать давление в ячейке на порядок (до 10^{-1} Торр) для ее уширения до 3 МГц. Но при уширении падает интенсивность поглощения излучения веществом. Во-вторых, с увеличением номера гармоники падает мощность излучения, что приводит к уменьшению сигнала с НЕВ-детектора и, как следствие, к ухудшению чувствительности спектрометра. В-третьих, в эксперименте отсутствовала селекция гармоник. На НЕВ-детектор приходят сразу все гармоники, генерируемые СР, причем гармоники низких номеров на порядки больше по мощности, чем используемые для спектро-

скопии гармоники высоких номеров. Это обстоятельство приводит к неизбежному ухудшению вольт-ваттной чувствительности НЕВ-детектора ввиду выхода его за пределы динамического диапазона. На рис. 6 представлен график измерения линии поглощения HDO 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.

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.

Исследование частично поддержано Министерством образования и науки РФ, договор № 14.В25.31.0007 и грант № 2014/134, грантом РФФИ № 13-02-91159-ГФЕН_а и грантом правительства РФ № 11.Г34.31.0066.

Список литературы

1. Vaks V. // J. of IR, MM and THz Waves. 2012. V. 33. No. 1. P. 43–53.
2. Пентин И.В., Смирнов А.В., Рябчун С.А. и др. // Журн. Техн. Физ. 2012. Т. 82. Вып. 7. С. 75–78.
3. Esaki L. and Tsu R. // IBM J. Res. Dev. 1970. V. 14. No. 61. P. 61–65.
4. Романов Ю.А., Романова Ю.Ю. // ФТП. 2005. Т. 39. Вып. 1. С. 162–170.
5. Павельев Д.Г., Демарина Н.В., Кошуринов Ю.И. и др. // ФТП. 2004. Т. 38. Вып. 9. С. 1141–1146.
6. Павельев Д.Г., Кошуринов Ю.И., Иванов А.С. и др. // ФТП. 2012. Т. 46. Вып. 1. С. 125–129.
7. Вакс В.Л., Панин А.Н., Басов С.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 7. С. 569–575.
8. Tretyakov I., Ryabchun S., Finkel M., et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. P. 033507.
9. <http://spec.jpl.nasa.gov/ftp/pub/catalog> (дата обращения 20.09.2012)

WIDEBAND HIGH-RESOLUTION SPECTROMETER OF THZ FREQUENCY RANGE

*V.A. Anfertiev, V.L. Vaks, I.V. Pentin, G.N. Goltsman, S.V. Seliverstov,
M.I. Finkel, S.A. Ryabchun, I.V. Tretyakov*

A possibility to develop a high-resolution terahertz (THz) spectrometer for a wide range of tasks is considered. The proposed spectrometer consists of a synthesizer based on a Gunn generator and a frequency multiplier based on a semiconductor superlattice as a radiation source, as well as a NbN hot-electron bolometer in a direct-detection mode as a THz radiation receiver. We present some experimental results for the spectrometer: the absorption lines of H₂O (1.92 THz, 17th harmonic) and of HDO (1.49 THz, 13th harmonic) have been registered. The results obtained are analyzed and further prospects to improve the spectrometer characteristics are considered.

Keywords: high resolution THz spectroscopy, semiconductor superlattice, superconductivity, superconducting NbN hot-electron bolometer, molecular gas spectroscopy.

References

1. Vaks V. // J. of IR, MM and THz Waves. 2012. V. 33. No. 1. P. 43–53.
2. Pentin I.V., Smirnov A.V., Ryabchun S.A. i dr. // Zhurn. Tehn. Fiz. 2012. T. 82. Vyp. 7. S. 75–78.
3. Esaki L. and Tsu R. // IBM J. Res. Dev. 1970. V. 14. No. 61. P. 61–65.
4. Romanov Ju.A., Romanova Ju.Ju. // FTP. 2005. T. 39. Vyp. 1. S. 162–170.
5. Pavel'ev D.G., Demarina N.V., Koshurinov Ju.I. i dr. // FTP. 2004. T. 38. Vyp. 9. S. 1141–1146.
6. Pavel'ev D.G., Koshurinov Ju.I., Ivanov A.S. i dr. // FTP. 2012. T. 46. Vyp. 1. S. 125–129.
7. Vaks V.L., Panin A.N., Basov S.A. i dr. // Izv. vuzov. Radiofizika. 2009. T. 52. № 7. S. 569–575.
8. Tretyakov I., Ryabchun S., Finkel M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. P. 033507.
9. <http://spec.jpl.nasa.gov/ftp/pub/catalog> (дата обращения 20.09.2012)