

ПРЕЦИЗИОННАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА: МЕТОДЫ, ПОДХОДЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ *

Применение микроволнового подхода к освоению ТГц диапазона позволило создать серию прецизионных методов и приборов для различных приложений. Ключевым моментом в разработке стало использование смесителей и умножителей на квантовых полупроводниковых сверхрешетках, позволяющих осуществлять более эффективное преобразование сигнала, чем традиционно используемые приборы на основе диодов Шоттки. В результате было создано уникальное семейство синтезаторов частоты на основе ЛОВ, перекрывающих диапазон от 667 до 1100 ГГц. Кроме того, применение методов нестационарной микроволновой спектроскопии и компонентов твердотельной электроники позволило реализовать твердотельный спектрометр ТГц диапазона, работающий в режиме фазовой манипуляции частоты. Высокая чувствительность и спектральное разрешение дает возможность использовать разработанный спектрометр для многих приложений. В докладе представлены результаты применения прибора для задач медицины и биологии, hi-tech и систем безопасности.

Ключевые слова: терагерцовый частотный диапазон, нестационарная микроволновая спектроскопия, квантовые полупроводниковые сверхрешетки, фазовая манипуляция частоты, чувствительность, спектральное разрешение.

V. L. Vaks

HIGH-PRECISE SPECTROMETRY OF THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE: THE METHODS, APPROACHES AND APPLICATIONS

The application of the microwave approach to development of the terahertz (THz) frequency range has resulted in elaboration of precise methods and devices for various applications. The key point of the development was employment of mixers and multipliers based on the quantum semiconductor superlattice structures, which provide more effective signal transformation in comparison with commonly used devices on Schottky diodes. As a result the unique family of the frequency synthesizers based on the backward wave oscillators operating in the frequency range of 667 ÷ 1100 GHz was designed and elaborated. Besides, application of the non-stationary microwave spectroscopy together with nanoelectronics devices yielded a solid state spectrometer of the THz frequency range, operating in a phase switching mode. The high sensitivity and spectral resolution let one employ the spectrometer for various applications. The results of the spectrometer applications for various problems of medicine and biology, as well as for hi-tech and security systems are also presented.

Keywords: terahertz frequency range, non-stationary microwave spectroscopy, quantum semiconductor superlattices, phase switching of the frequency, sensitivity, spectral resolution.

Введение

Интенсивное освоение терагерцового (ТГц) диапазона частот привело к созданию целого ряда различных источников и приемников излучения, а также спектрометров на их основе. Все подходы, применяемые для разработки ТГц техники, можно подраз-

делять на два типа: оптический и микроволновый. С применением оптического подхода созданы такие источники когерентного излучения, как молекулярные лазеры с оптической накачкой, лазеры на свободных электронах и квантово-каскадные лазеры (ККЛ). Молекулярные лазеры с оптической накачкой – это компактные приборы, рабо-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ: проекты 10-08-01124-а, 09-02-97039-р_поволжье_а, 09-02-97085-р_поволжье_а, а также Программы ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики».

тающие в диапазоне до нескольких ТГц, с хорошей стабильностью частоты и выходной мощностью излучения порядка нескольких десятков мВт [1]. Недостатками являются дискретность перестройки частоты генерации и, вследствие этого, небольшой участок ТГц диапазона, который они перекрывают. Лазеры на свободных электронах [2] известны как одни из самых мощных генераторов (и усилителей), работающие в широкой области частот, но из-за больших размеров и стоимости, недостаточной стабильности частоты их применение ограничено лабораторией. Полученные за последние годы результаты по созданию ККЛ дают основания считать, что они в будущем станут перспективными источниками ТГц излучения, полезными для многих приложений, включая ТГц-спектроскопию и ТГц-видение [3]. Пока же актуальным направлением дальнейших исследований является решение ряда задач, необходимых для практических применений ККЛ: стабилизация частоты, увеличение диапазона перестройки и переход на рабочие температуры, близкие к комнатным. На сегодняшний день самыми распространенными источниками ТГц излучения являются широкополосные источники на основе фемтосекундных лазеров с использованием фотопроводящих переключателей [4], облучаемых сверхкороткими лазерными импульсами, или метода оптической ректификации в нелинейных кристаллах [5]. Связано это с тем, что такие системы являются доступными за счет наличия промышленных лазеров, а методика измерений весьма проста и хорошо отработана. Применение таких широкополосных сигналов в ТГц спектрометрах позволяет получать спектральное разрешение порядка $1 \div 30$ ГГц, что недостаточно для прецизионных измерений. Для газовой спектроскопии спектроскопические требования к характеристикам источника излучения определяются доплеровским разрешением и возможностью измерения частоты с точностью $\sim 10^{-8} - 10^{-10}$.

Терагерцовая нестационарная спектроскопия

Отдельное направление в освоении ТГц диапазона принадлежит микроволновым методам. Традиционным подходом для соз-

дания стабильных генераторов в физике микроволн является умножение частоты высокостабильного опорного синтезатора. Ключевыми элементами такой схемы являются умножители частоты, смесители и усилители сигнала. Применение в нашей работе смесителей и умножителей на квантовых полупроводниковых сверхрешетках (КПСР) [6], позволяющих осуществлять более эффективное преобразование сигнала, чем традиционно используемые приборы на основе диодов Шоттки, позволило реализовать серию прецизионных методов и приборов для различных приложений. В результате было создано уникальное семейство синтезаторов частоты на основе лампы обратной волны (ЛОВ), перекрывающих диапазон от 667 до 1100 ГГц [7]. В основе разработки лежит использование гармонических смесителей на КПСР, обеспечивающих эффективное преобразование (с номерами гармоник 37-55) частоты в ТГц частотный диапазон.

Применение методов нестационарной микроволновой спектроскопии и компонентов твердотельной электроники позволило реализовать твердотельный спектрометр ТГц диапазона [8], работающий в режиме фазовой манипуляции частоты [9]. В результате взаимодействия фазоманипулированного излучения с резонансно поглощающими молекулами происходит периодический процесс наведения и распада макроскопической поляризации молекул. Этот процесс можно представить как включение импульсного сигнала на частоте молекулярного резонанса и возникновение поглощения излучения молекулами, после чего переключается фаза (или частота) сигнала, и происходит релаксация поляризации молекул. Возникающие в результате этого переходные сигналы регистрируются и накапливаются в приемной части спектрометра. По величине и форме этих сигналов можно с высокой точностью определить концентрацию исследуемых компонент газовой смеси. Разработанный спектрометр включает в себя ТГц источники излучения, созданные на основе фазово-стабильных генераторов Ганна, работающих в диапазоне частот 89-117 ГГц, с использованием в качестве опорного серийного синтезатора частот диапазона 8-12,5 ГГц. Сигнал опорного генератора умножается с помощью твердо-

тельных устройств. Умножитель частоты терагерцового частотного диапазона разработан на основе КПСР GaAs/AlAs. В предложенной схеме молекулы газа в ячейке взаимодействуют с резонансной ТГц гармоникой. Приемный блок спектрометра разработан и создан на основе цифрового рекурсивного фильтра 1-го порядка, собранного на одном кристалле фирмы ALTERA. Высокая чувствительность и спектральное разрешение дают возможность использовать созданный спектрометр для многих приложений: медицина и биология, hi-tech и системы безопасности.

Одним из важных применений созданного спектрометра стала неинвазивная медицинская диагностика на основе анализа выдыхаемого воздуха [10]. Такой анализ дает возможность диагностировать целый ряд серьезных заболеваний, используя результаты измерения концентрации веществ-маркеров в выдыхаемом воздухе. Был проведен контроль изменения концентрации NO в выдыхаемом воздухе пациентов после сеанса лучевой терапии. При проведении клинических испытаний отмечено практически полное отсутствие оксида азота в выдыхаемом воздухе у здоровых лиц и появление соответствующего вещества у онкологических больных, получающих лучевое лечение по поводу рака легкого.

К наиболее актуальным проблемам hi-tech относится задача обнаружения примесей в высокочистых веществах. Проведенное исследование примесного состава изотопически обогащенного тетрафторида кремния показало наличие фреонов, что не было зафиксировано другими методами [11]. Также с помощью разработанного спектрометра был проведен анализ состава СН-плазмы при осаждении алмазных пленок in situ.

Перспективный метод дистанционного обнаружения взрывчатых веществ (ВВ) основан на детектировании продуктов их распада, испаряющихся с поверхности. В наших исследованиях был проведен анализ состава паров некоторых ВВ (ТНТ, НГ, гексоген) и обнаружен ряд веществ, которые могут являться маркерами для дистанционного обнаружения [12].

Список литературы

1. *Zhihong H., Xia R., Yang Ya. et al*, Study of optimal gas pressure in optically pumped D₂O gas terahertz laser. In: Terahertz Photonics. Eds. Zhang C., Zhang X-C. // Proc. SPIE. 2007. V.6840. P.684004.
2. *Madey J.* Spontaneous emission of brems strahlung in a periodic magnetic field // J. Appl. Phys. 1971. V.42. P.906-1913.
3. *Belkin M., Capasso F., Xie F.* Room temperature terahertz quantum cascade laser source based on intracavity difference-frequency generation // Appl. Phys. Lett. 2008. V.92. P.201101.
4. *Zhao G., Schouten R.N., Wenckenbach W.T. et al*, Design and performance of a THz emission and detection setup based on a semi-insulating GaAs emitter // Rev. Sci. Instr. 2002. V.73. P.1715-1721.
5. *Hoffmann M.C., Yeh K-L., Hwang H.Y. et al*, Fiber laser pumped high average power single-cycle terahertz pulse source // Appl. Phys. Lett. 2008. V.93. P.141107.
6. *Paveliev D.G., Koshurinov Yu.I., Koshelets V.P. et al*, Investigations of mixers noises on semiconductor superlattices. // 16th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT 2005), Chalmers, Sweden, May 2-4, 2005. Book of Abstracts. P1-16.
7. *Вакс В.Л., Кошуринов Ю.И., Павельев Д.Г. и др.*, Разработка и создание системы фазовой синхронизации в субтерагерцовом и терагерцовом частотных диапазонах по гармонике сигнала синтезатора сантиметрового диапазона // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2005. Т.48. № 10-11. С.933.
8. *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. 2009. Т.52. № 7. С. 569-575.
9. *Brailovsky A.B., Khodos V.V., Vaks V.L.* Millimeter range spectrometer with phase switching – novel method for reaching of the top sensitivity // Infrared & Millimeter Waves. 1999. V. 20. No 5. P. 883-896.
10. *Вакс В.Л., Домрачева Е.Г., Никифоров С.Д. и др.*, Применение микроволновой нестационарной спектроскопии для неинвазивной медицинской диагностики // Изв.

вузов Радиофизика. 2008. Т. 51. № 6. С. 490-498.

11. Вакс В.Л., Домрачева Е.Г., Клюева Н.В. и др., Применение методов инфракрасной и микроволновой спектроскопии высокого разрешения для исследования примесного состава тетрафторида кремния // Оптика и спектроскопия. 2006. Т.100. № 4. С. 626.

12. Вакс В.Л., Набиев Ш.Ш., Собакинская Е.А. и др., СубТГц и ИК Фурье спектроскопия паров взрывчатых веществ // XXIV съезд по спектроскопии, посвящ. 100-летию со дня рождения С.Л.Мандельштама 28 февраля – 5 марта 2010 г., Москва, Троицк. Тезисы докладов. Том 1. С.53-54.

03.09.2010