

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ СПЕКТРА ТЕРАГЕРЦОВОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2013 М.О. Осипова, Я.В. Грачев, В.Г. Беспалов

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра фотоники и оптоинформатики

Поступила в редакцию 26.11.2013

Предложен метод определения границ спектра широкополосного терагерцового излучения для систем спектроскопии с разрешением во времени.

Ключевые слова: ТГц, импульсное терагерцовое излучение, терагерцовая спектроскопия с разрешением во времени, ширина спектра.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Терагерцовым излучением принято называть излучение в частотном диапазоне от 300 ГГц до 10 ТГц. Располагаясь на шкале частот между ИК и миллиметровым диапазоном спектра, ТГц излучение обеспечивает широкие возможности для изучения молекулярной структуры веществ, т.к. большинство колебательных и вращательных спектров молекул вещества находятся в области этих частот.

В терагерцовой спектроскопии с разрешением во времени [1] для достоверного определения оптических характеристик исследуемых материалов и образцов важно определение низко- и высокочастотной границы спектра используемого излучения. Однако, в настоящее время отсутствуют описания методов, позволяющих точно определять границы спектра, внутри которых измерения будут достоверны [2, 3, 4, 5]. В работе предлагается метод определения ширины спектра импульсного излучения, позволяющий однозначно выбрать диапазон частот, который следует использовать в спектроскопических исследованиях для достижения достоверных результатов.

### 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Предлагаемый метод разрабатывался для систем спектроскопии с разрешением во времени.

#### 2.1. Генерация ТГц излучения

В настоящей работе используется известный метод генерации импульсного терагерцового из-

лучения, в котором поверхность полупроводника, помещенного в магнитное поле, служит преобразователем сверхкоротких импульсов лазерного излучения в терагерцовые импульсы [6]. Мощный оптический импульс фемтосекундной длительности (накачка) поглощается в поверхностном слое полупроводникового кристалла, образуя электрон-дырочные пары. В дальнейшем электроны, обладающие большей подвижностью по сравнению с дырками, продвигаются вглубь полупроводника, образуя электрическое поле Дембера. При прекращении воздействия импульса накачки на поверхность полупроводника, электроны возвращаются к поверхности полупроводника, рекомбинируя с дырками. Образующийся движением электронов диполь генерирует терагерцовый импульс, длительность и спектр которого определяется подвижностью носителей заряда, а также скоростью рекомбинации электронов и дырок. В данной работе, используя полупроводниковый кристалл InAs и импульсы накачки длительностью 200 фс на длине волны  $\lambda = 1,04$  мкм, получили терагерцовые импульсы длительностью 2,5 пс и спектром от 0,06 до 1,7 ТГц.

#### 2.2. Детектирование ТГц излучения

В схемах ТГц спектроскопии с разрешением во времени чаще всего для детектирования импульса используют два общеизвестных метода: электро-оптический [6] и с помощью фотопроводящих антенн [7].

В данной работе детектирование терагерцового импульса происходило электро-оптическим методом. При одновременном прохождении фемтосекундного импульса (пробного пучка) и терагерцового импульса в электрооптическом кристалле, напряженность электрического поля терагерцового импульса, медленно изменяющаяся относительно поля фемтосекундного импульса, наводит в кристалле двулучепреломление для

Осипова Мария Олеговна, студентка, лаборант.

E-mail: osipovato@ya.ru

Грачев Ярослав Владимирович, инженер-исследователь.

E-mail: grachev\_y@mail.ru

Беспалов Виктор Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор. E-mail: victorbespaloff@gmail.com

пробного импульса, вследствие линейного электрооптического эффекта.

Таким образом, величина двулучепреломления прямо пропорциональна напряженности электрического поля терагерцовой волны в данной временной точке. С помощью линии оптической задержки изменяется точка пересечения пробного импульса с временной координатой терагерцовой волны в кристалле. Система измерения двулучепреломления описана в [8].

### 3. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРИНЫ СПЕКТРА

В экспериментальную схему был добавлен набор нейтральных светофильтров (OF), позволяющий изменять мощность излучения накачки, падающего на кристалл-генератор InAs. Окончательная схема установки показана на рис. 1. В эксперименте мощность излучения накачки изменялась в диапазоне от 27 до 370 мВт и для каждого значения мощности измерялась временная форма терагерцового импульса. Зарегистрированные временные формы импульсов представлены на рис. 2(а).

Если рассмотреть амплитуду терагерцового импульса в его максимуме, находящемся во временной координате 5 пс на рисунке 2(а), то видно, что в пределах погрешности эксперимента она линейно зависит от мощности возбуждающего излучения: рис. 2(б). Среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных от линейной аппроксимации составило 12%.

Далее путем прямого преобразования Фурье были получены спектральные плотности мощно-

сти терагерцовых импульсов при различных значениях мощности накачки. Так как операция преобразования Фурье линейная, то спектральная плотность мощности также зависит линейно от мощности накачки. Варьируя мощность излучения накачки, в частотном представлении ТГц импульса можно обнаружить область, где мощность спектра изменяется линейно с положительным наклоном аппроксимирующей прямой и области, где наклон нулевой или отрицательный (рис. 3), так как терагерцовое излучение в таких частотных областях не генерируется. За спектр импульса естественно выбрать частоты, на которых угол наклона аппроксимирующей линии положителен – рис. 4(а,б).

#### 3.1. Краткая формулировка метода

Регистрируются частотные спектры ТГц импульса при различной величине мощности излучения накачки ТГц генератора. Для каждой частоты ТГц импульса вычисляется угол наклона  $\alpha(f)$  по формуле  $\alpha(f) = \arctg(P_{ТГц}(f)/P_{нак})$ , где  $P_{ТГц}(f)$  – величина спектральной плотности мощности на частоте  $f$ ,  $P_{нак}$  – величина мощности на частоте излучения накачки ТГц генератора. Минимальная и максимальная частота  $f_{мин}$  и  $f_{max}$  не отрицательной величины угла наклона  $\alpha(f)$  являются низкочастотной  $f_{мин}$  и высокочастотной  $f_{max}$  границами спектра ТГц импульса соответственно.

Таким образом, проблема определения рабочего спектрального диапазона прибора для достоверных измерений решается путем проведения простого исследования.

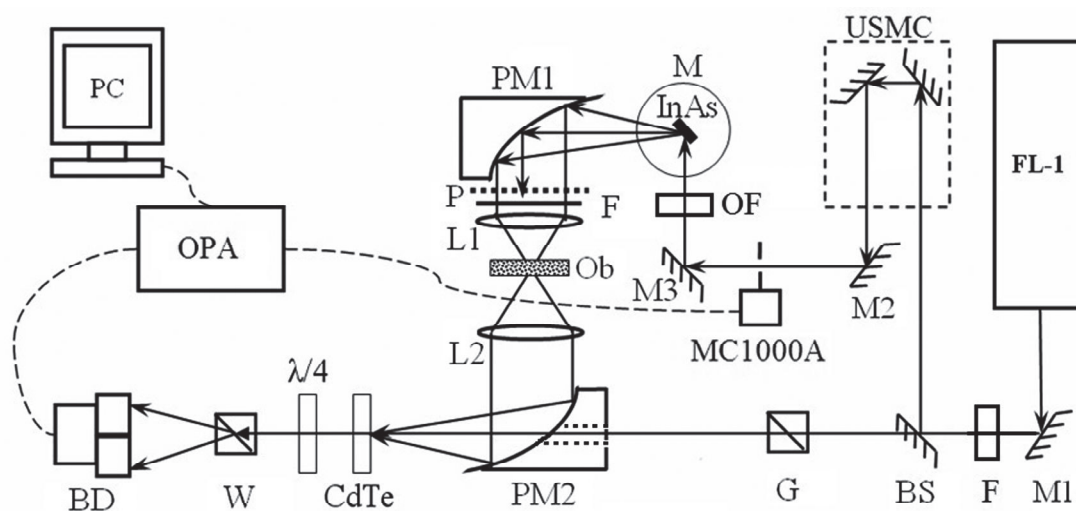
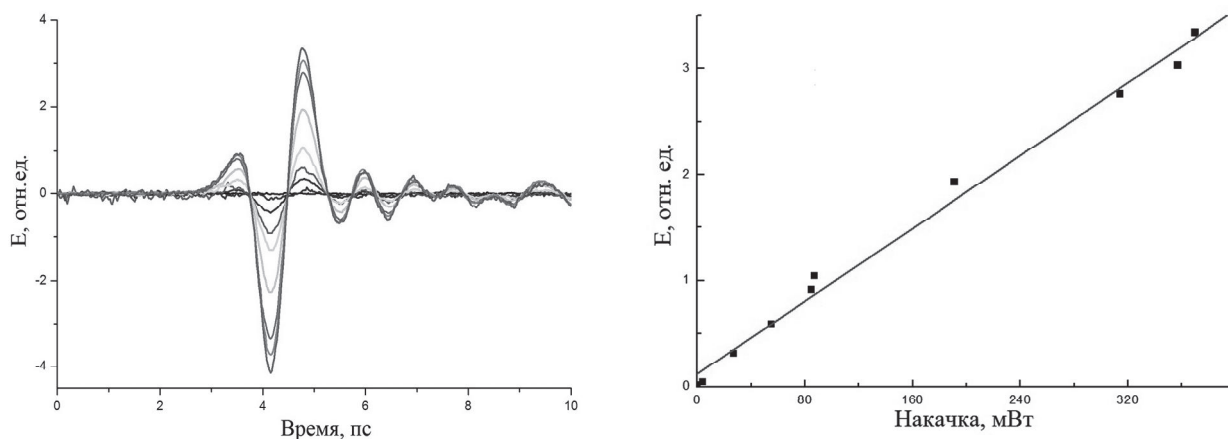
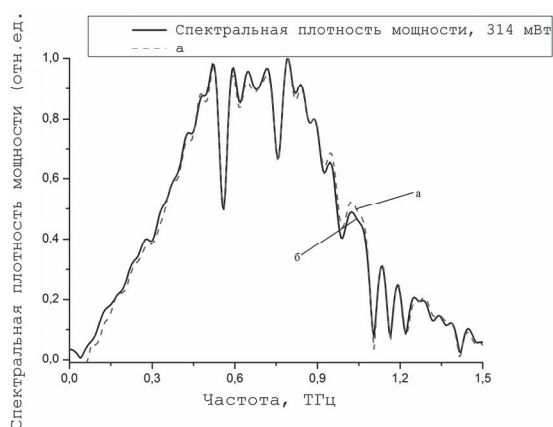


Рис. 1. Экспериментальная схема импульсной ТГц спектроскопии:

FL-1 – фемтосекундный Yb:KYW лазер, M1, M2, M3 – зеркала, F – нейтральный светофильтр, BS – делитель пучка, USMC – линия задержки, MC1000A – оптико-механический модулятор, OF – набор светофильтров, InAs – кристалл InAs, M – магнит, G – призма Глана, PM1, PM2 – параболические зеркала, P – поляризатор, F – фильтр, L1, L2 – линзы, Ob – объект, CdTe – электро-оптический кристалл, W – призма Волластопа, BD – балансный фотоприемник, OPA – синхронный усилитель, PC – ПК



**Рис. 2.** а – временные формы ТГц импульсов;  
 б – напряженность электрического поля импульсов в точке 5 пс при различной мощности возбуждающего излучения

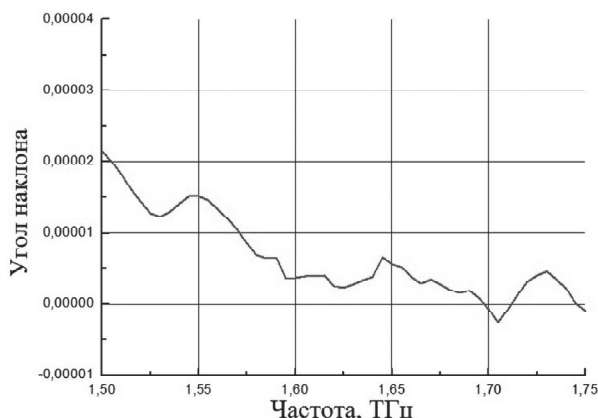
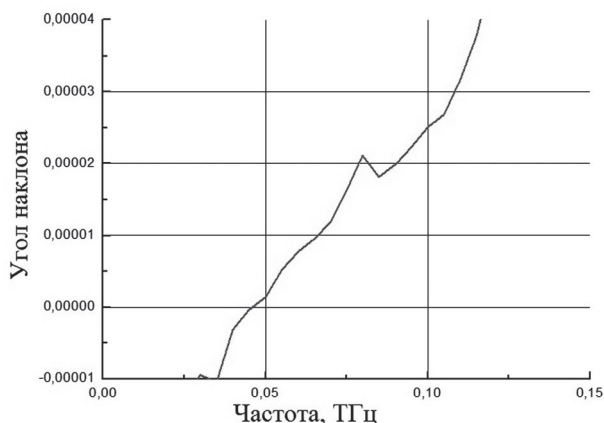


**Рис. 3.** а – спектральная плотность мощности для мощности накачки 314 мВт;  
 б – спектр угла наклона прямой

#### 4. ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ СПЕКТРА ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ

Для определения погрешности метода была проведена серия измерений на рабочем спектрометре с неточно настроенной системой детектирования, что сказалось на уменьшении ширины спектра ТГц импульса.

Для каждого значения мощности накачки



**Рис. 4.** а – низкочастотная область спектра; б – высокочастотная область спектра

была получена серия временных форм ТГц импульса. Оказалось, что значения угла наклона аппроксимирующей прямой для всех серий измерений распределены по нормальному закону, а это значит, что и верхние и нижние частоты спектра имеют такое же распределение. Для доверительной вероятности 0,95 результаты определения границ спектра имеют погрешность 0,06 ТГц.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан простой и эффективный экспериментальный метод определения ширины спектра терагерцового импульса для систем спектроскопии с разрешением во времени. Показано его применение на терагерцовом спектрометре НИУ ИТМО с электрооптическим детектированием с использованием кристалла CdTe, рабочий спектральный диапазон которого занимает частоты от 0,05 до 1,70 ТГц.

В сущности, данный метод применим в любых системах спектроскопии с разрешением во времени, позволяющих варьировать мощность генерируемого терагерцового излучения. Возможность определения рабочей ширины спектра проверена

на нескольких спектрометрах. Рабочий диапазон спектрометра с генерацией на InAs и детектированием на антенне iPCAP-21-05-1000-800-h (Vator, Германия) с использованием излучения длительностью 20 фс составил 0,45-1,27 ТГц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nuss M.C., Orenstein J. Terahertz time-domain spectroscopy // Topics in Applied Physics, 1998, 74, p. 7-50.
2. Sakai K. Terahertz Optoelectronics. Springer, 2005. P. 350.
3. Rostami, Rasooli, Hassan, Baghban, Hamed. Terahertz Technology: Fundamentals and Applications // Series: Lecture Notes in Electrical Engineering, 2011. P. 300.
4. Zhang X.-C., Jingzhou Xu. Introduction to THz wave photonics. Springer Science+Business Media, 2009. P. 249.
5. Terahertz Time-Domain Spectroscopy of Human Blood / C.B. Reid, G. Reese, A.P. Gibson, V.P. Wallace // IEEE Biomedical and Health Informatics, 2013. 17. P. 774-778.
6. Генерация излучения в дальнем ИК диапазоне спектра при фемтосекундном оптическом возбуждении полупроводника InAs в магнитном поле / В.Г. Беспалов, В.Н. Крылов, С.Э. Путилин, Д.И. Стаселько // Оптика и спектроскопия. 2002. Т. 93. № 1. С. 158-162.
7. Wu Q., Zhang X.-C. Free-space electro-optic sampling of terahertz beams // Appl. Phys. Lett. 1995. 67. P. 3523-3525.
8. Detection of up to 20 THz with a low temperature-grown GaAs photoconductive antenna gated with 15 fs light pulses / S. Kono, M. Tani, P. Gu, K. Sakai // Appl. Phys. Lett. 2001. 77. P. 4104-4106.
9. Царев М.В. Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. С. 12-48.

#### METHOD OF DETERMINING THE BOUNDARIES OF BROADBAND THZ RADIATION SPECTRUM

© 2013 M.O. Osipova, Y.V. Grachev, V.G. Bepalov

Saint-Petersburg National Research University of Informational Technologies,  
Mechanics and Optics Department

In this article we proposed a method of determining the boundaries of the broadband terahertz spectrum in time-domain spectroscopy systems.

Key words: THz, pulsed terahertz radiation, terahertz time-domain spectroscopy, spectral bandwidth.

---

Maria Osipova, Student, Laboratory Assistant.

E-mail: osipovamo@ya.ru

Yaroslav Grachev, Research Engineer.

E-mail: grachev\_y@mail.ru

Viktor Bepalov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.

E-mail: victorbepaloff@gmail.com