

# Сравнение электрооптической системы и фотопроводящей антенны, используемых в качестве детекторов импульсного терагерцевого излучения, с помощью нового метода определения ширины спектра\*

Я.В.Грачев, М.О.Осипова, В.Г.Беспалов

*Предложенным ранее методом определения границ спектра широкополосного терагерцевого излучения для систем спектроскопии с разрешением во времени протестированы две системы детектирования – электрооптическая система и фотопроводящая антенна. Из серии измерений вычислена погрешность определения рабочих диапазонов. Терагерцевый спектрометр с электрооптическим детектором на основе кристалла ZnTe (110) толщиной 2 мм обладает рабочим спектральным диапазоном 0.059 – 1.092 ТГц. Детектор на основе фотопроводящей антенны iPSA-21-05-1000-800-h при регистрации сигнала от того же источника продемонстрировал большую ширину полосы рабочего диапазона – от 0.017 до 1.6 ТГц. Разработанный метод позволил экспериментально сравнить параметры рассматриваемых терагерцевых спектрометров, достигаемые при неизменном качестве юстировки.*

**Ключевые слова:** импульсное терагерцевое излучение, терагерцевая спектроскопия с разрешением во времени, ширина спектра.

## 1. Введение

Терагерцевым излучением принято называть излучение в частотном диапазоне 300 ГГц–10 ТГц. Находясь на шкале частот между ИК и миллиметровыми диапазонами 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 [1–4].

Для систем импульсной ТГц спектроскопии актуальной является задача определения частотного диапазона, в котором прибор позволяет получать достоверные данные [5–8]. В настоящее время рабочий диапазон в этих системах определяется путем нахождения области пересечения спектра плотности мощности ТГц импульса со спектром шума системы детектирования, полученным при проведении измерений в отсутствие ТГц сигнала. Однако при очень малом шуме системы детектирования уровень шума в последнем случае может быть значительно ниже, чем в спектре ТГц импульса, что делает невозможным достоверное определение рабочего спектрального диапазона [3]. Разработанный нами метод позволяет определять в системах импульсной ТГц спектроскопии ширину рабочих частотных диапазонов, в которых амплитуда сигнала достоверно больше амплитуды шума [9]. Целью настоящей работы является тестирование разработанного ранее метода определения границ спектра широкополосного ТГц излучения для систем спектроскопии с разрешением

во времени, а также сравнение ширины спектра ТГц импульса, зарегистрированного от одного источника двумя системами детектирования: основанной на линейном электрооптическом эффекте и на фотопроводящей антенне.

## 2. Экспериментальная установка

В экспериментах была использована схема ТГц спектрометра с разрешением во времени [3], имеющая две системы детектирования, между которыми возможно переключение (рис. 1).

В спектрометре использовался фемтосекундный лазер TiF-15 (Авеста-Проект, Россия), излучающий импульсы длительностью 35 фс на центральной длине волны 800 нм. Средняя выходная мощность лазера составляла 350 мВт, частота повторения импульсов – 70 МГц. Источником ТГц излучения служил нелегированный кристалл InAs,

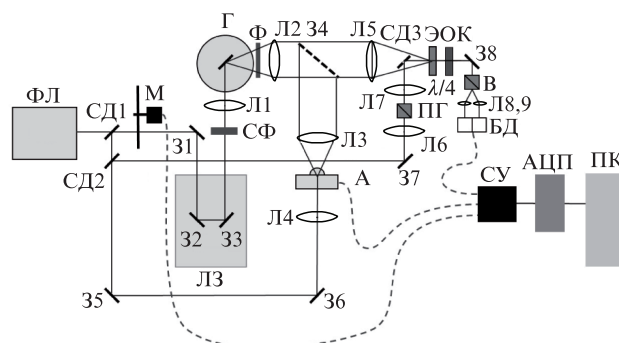


Рис. 1. Экспериментальная схема импульсного ТГц спектрометра: ФЛ – фемтосекундный лазер; СД1–СД3 – светоделители; 31–38 – зеркала; М – модулятор; Л3 – линия задержки; СФ – набор нейтральных светофильтров; Л1–Л9 – линзы; Г – генератор ТГц излучения; Ф – ТГц фильтр; А – фотопроводящая антенна; ПГ – призма Глана; ЭОК – электрооптический кристалл;  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластинка; В – призма Волластона; БФ – балансный фотоприемник; СУ – синхронный усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – компьютер.

\* Доложена на III Международной конференции по фотонике и информационной оптике, Россия, Москва, январь 2014 г.

Я.В.Грачев, М.О.Осипова, В.Г.Беспалов. Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; e-mail: grachev\_y@mail.ru, victorbespaloff@gmail.com

Поступила в редакцию 7 апреля 2014 г., после доработки – 8 сентября 2014 г.

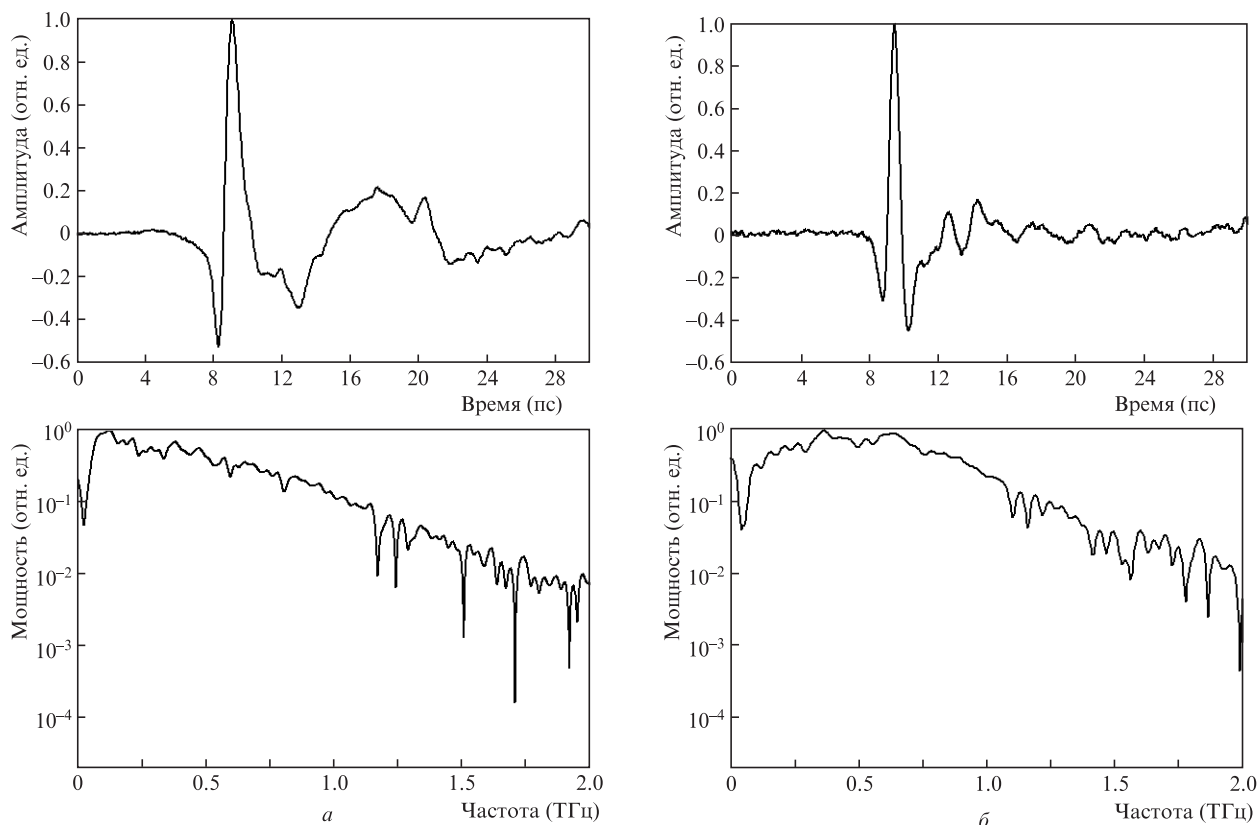


Рис.2. ТГц импульс во временном и спектральном представлениях, зарегистрированный фотопроводящей антенной (а) и электрооптической системой детектирования (б).

помещенный в поле постоянного магнита с индукцией 2.4 Тл. Далее излучение коллимировалось линзой с фокусным расстоянием 50 мм из полиметилпентена (Тидекс, Россия) и направлялось зеркалом 34 на систему с фотопроводящей антенной-детектором iPCA-21-05-1000-800-h (ВАТОР, Германия) либо на электрооптическую систему детектирования с кристаллом ZnTe (110) толщиной 2 мм. Мощность излучения накачки регулировалась набором нейтральных светофильтров. Для обеспечения работы диодов балансного детектора в линейном режиме интенсивность пробного пучка в электрооптической системе снижалась. Соотношение сигнал/шум в одиночных измерениях составляло 200 для фотопроводящей антенны и 80 – для электрооптической схемы детектирования (рис.2).

### 3. Метод определения ширины спектра

Разработанный ранее метод определения ширины спектра в импульсных ТГц спектрометрах описан в [9]. Чтобы его использовать, необходимо зарегистрировать ТГц импульсы различной амплитуды, изменяя мощность излучения накачки, например светофильтрами (рис.3.а). Затем их спектры анализируются в ТГц диапазоне, и для каждой частоты выделяется зависимость спектральной плотности мощности ТГц излучения от мощности излучения накачки. Мощность излучения накачки подбирается таким образом, чтобы мощность генерируемого ТГц излучения зависела от нее линейно, не достигая насыщения. В этом случае производная от спектральной плотности мощ-

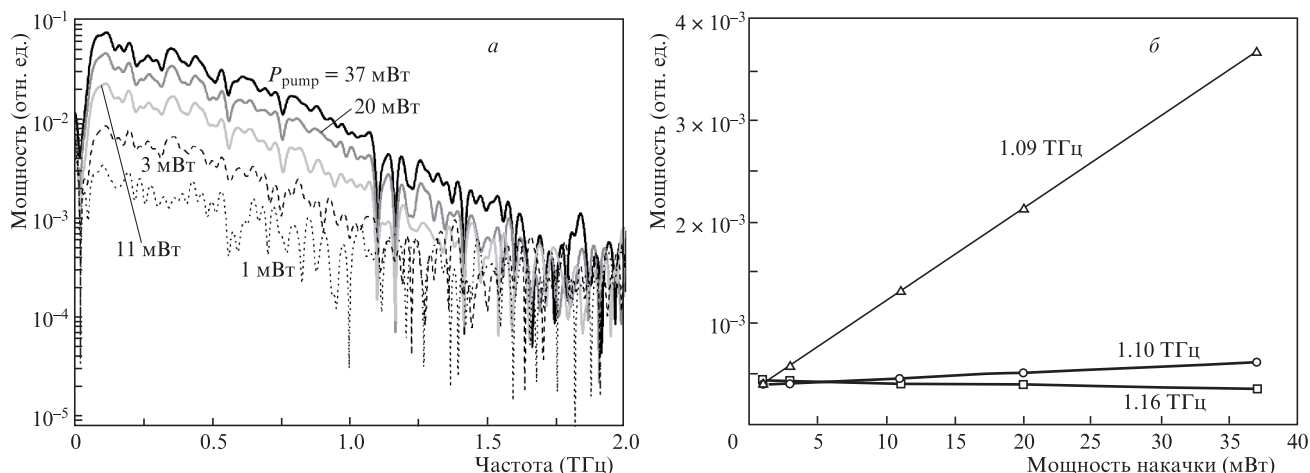


Рис.3. Частотные спектры ТГц импульсов при различных мощностях излучения накачки  $P_{pump}$  (а) и зависимости мощности ТГц излучения от мощности излучения накачки при разных частотах (б).

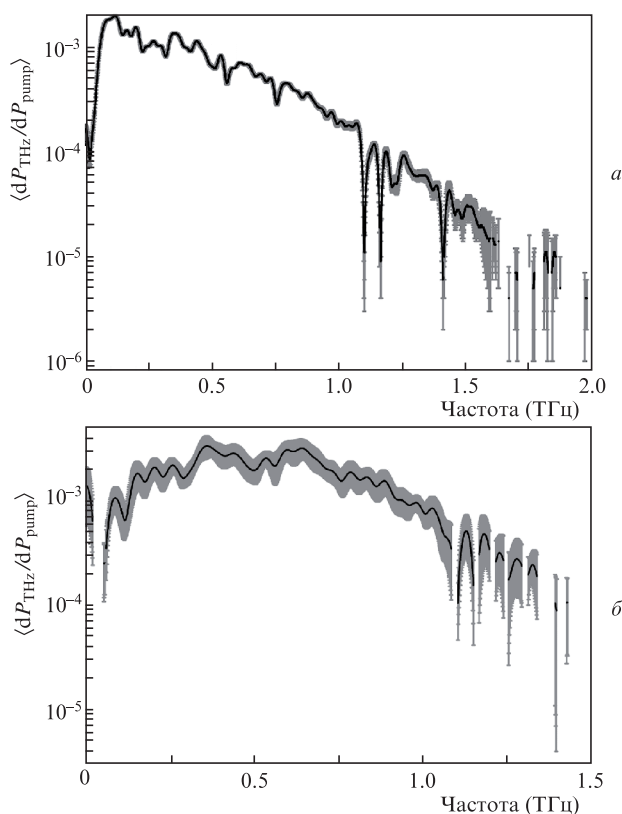


Рис.4. Спектры средней производной мощности ТГц излучения по мощности излучения накачки для фотопроводящей антенны (а) и электрооптической системы детектирования (б).

ности по мощности излучения накачки ( $dP_{\text{THz}}/dP_{\text{pump}}$ ) соответствует углу наклона аппроксимирующей прямой. При ее положительном наклоне излучение на этой частоте генерируется и детектируется в системе спектрометра. При отрицательном или нулевом наклоне на определенной частоте излучение либо отсутствует, либо его мощность недостаточна для регистрации имеющейся системой детектирования (рис.3,б).

#### 4. Сравнение электрооптической системы и фотопроводящей антенны, используемых в качестве детекторов ТГц излучения

Для обеих систем детектирования была осуществлена серия измерений поля ТГц импульса при средней мощности излучения накачки 37, 20, 11, 3 и 1 мВт. Для каждого этого значения проводилось восемь измерений поля ТГц импульса, которые составляли одну серию. Для каждой серии измерений по методу, описанному выше, вычислялся спектр производной мощности ТГц излучения по мощности излучения накачки и рассчитывался средний спектр  $\langle dP_{\text{THz}}/dP_{\text{pump}} \rangle$  (рис.4).

При регистрации сигнала от одного источника результаты обеих систем детектирования существенно различаются. Система детектирования на фотопроводящей антенне, обладая в данном эксперименте большим соотношением сигнал/шум, имеет более широкую частотную полосу – от 0.017 до 1.6 ТГц, а электрооптическая система – от 0.059 до 1.092 ТГц (рис.4). Обычно же спектральный диапазон установки с системой электрооптического детек-

тирования больше, чем с антенной-детектором [10]. Однако в настоящей работе установка с антенной-детектором была съюстирована точнее, чем установка с электрооптической системой детектирования.

В низкочастотной области в обоих спектрах имеются всплески плотности мощности около нулевой частоты, вызванные ненулевым уровнем измеряемого сигнала, предшествующего ТГц импульсу во временном представлении. За начало рабочего диапазона прибора принимается область положительного роста спектральной плотности мощности при увеличении частоты. В высокочастотной области присутствуют линии поглощения воды на частотах 1.1 и 1.2 ТГц (рис.4). Динамический диапазон нашей электрооптической схемы для измерения формы и глубины этих линий недостаточен и в диапазоне 1.1 – 1.5 ТГц, несмотря на присутствие в нем областей с положительной производной  $dP_{\text{THz}}/dP_{\text{pump}}$  (рис.4). Поэтому проведение достоверных измерений здесь затруднительно. Таким образом, за конец диапазона надежных измерений прибора следует принять частоту 1.1 ТГц. После этой частоты наблюдаются окна прозрачности паров воды, которые можно использовать в исследованиях, но при условии дополнительной статистической проверки достоверности измерений.

Проведенные эксперименты показали, что данный метод позволяет определить рабочий частотный диапазон ТГц спектрометров с разрешением во времени с целью их корректного использования в исследованиях.

#### 5. Заключение

С помощью разработанного ранее метода определения ширины спектра терагерцевого импульса для систем спектроскопии с разрешением во времени экспериментально определены рабочие частотные диапазоны двух систем детектирования и из серии измерений вычислена погрешность определения их рабочих диапазонов. Терагерцевый спектрометр с электрооптическим детектированием на основе кристалла ZnTe обладает рабочим спектральным диапазоном 0.059 – 1.092 ТГц. Детектор на основе фотопроводящей антенны iPCA-21-05-1000-800-h при регистрации сигнала от того же источника продемонстрировал бóльшую ширину полосы рабочего диапазона – от 0.017 до 1.6 ТГц. Разработанный метод позволил экспериментально сравнить ширины полос рабочего диапазона, полученные при высокой, но не предельной точности юстировки терагерцевых спектрометров с двумя различными системами детектирования.

Работа выполнена по заданию № 3.1675.2014/К на НИР в рамках пректной части государственного задания в сфере научной деятельности.

1. Sakai K. *Terahertz Optoelectronics* (Berlin: Springer, 2005, p. 7).
2. Rostami A., Rasooli H., Baghban H. *Terahertz Technology: Fundamentals and Applications* (Berlin: Springer, 2010, p. 15).
3. Zhang X.C., Xu J. *Introduction to THz Wave Photonics* (New York: Springer, 2009, p. 75).
4. Reid C.B. et al. *IEEE Biomed. Health Inform.*, **17**, 774 (2013).
5. Cai Y., Brener I., Lopata J., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 444 (1998).
6. Беспалов В.Г. и др. *Оптика и спектроскопия*, **93**, 158 (2002).
7. Wu Q., Zhang X.C. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3523 (1995).
8. Kono S., Tani M., Gu P., Sakai K. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 4104 (2001).
9. Осипова М.О., Грачев Я.В., Беспалов В.Г. *Изв. Самарского научного центра РАН*, **15**, 117 (2013).
10. Leitenstorfer A. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 1516 (1999).