

## 22. Исследование динамики распространения сверхширокополосных пучков с орбитальным угловым моментом методом импульсной терагерцовой голографии

Н. В. Петров<sup>1</sup>, М. С. Куля<sup>1</sup>, Б. В. Соколенко<sup>1</sup>, А. А. Городецкий<sup>1,2</sup>, В. А. Коклюшкин<sup>1</sup>,  
Я. В. Граячев<sup>1,3</sup>, Н. С. Балбекин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Бирмингемский университет, Бирмингем, Великобритания

<sup>3</sup> Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

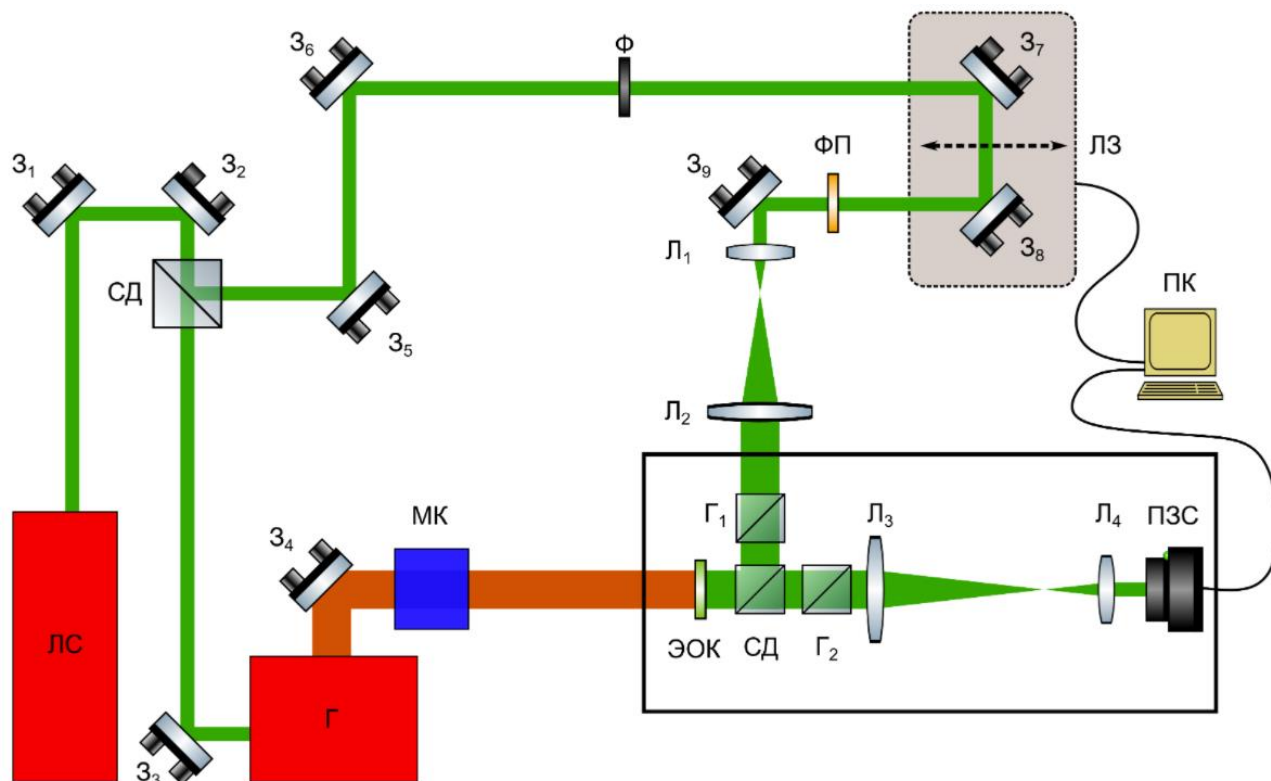
В докладе обсуждаются особенности использования метода импульсной терагерцовой голографии для исследования процесса распространения сверхширокополосных пучков с орбитальным угловым моментом. Данному вопросу в последнее время уделяется большое внимание в связи с возможностью использования таких пучков для задач беспроводной телекоммуникации в терагерцовом диапазоне частот. Представлена система детектирования терагерцовых полей, собранная из оптомеханических узлов, изготовленных методами 3D-печати.

*Ключевые слова:* Цифровая голография, Терагерцовое излучение, Пучки с орбитальными угловым моментом, Сверхкороткие импульсы, Гиперспектральная визуализация.

*Цитирование:* **Петров, Н. В.** Исследование динамики распространения сверхширокополосных пучков с орбитальным угловым моментом методом импульсной терагерцовой голографии / Н. В. Петров, М. С. Куля, Б. В. Соколенко, А. А. Городецкий, В. А. Коклюшкин, Я. В. Граячев, Н. С. Балбекин // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 138–141.

### Введение

Среди широкого спектра применений импульсного терагерцового (ТГц) излучения можно выделить два больших интегральных направления: исследование объектов и материалов и зондирование волнового фронта. Первое направление включает в себя задачи визуализации и построения изображений объектов, спектральный анализ и аспекты, связанные с исследованием динамики носителей зарядов, в то время как второе охватывает исследование характеристик сверхширокополосных волновых полей ТГц диапазона частот применительно к проблемам создания высокоскоростных систем беспроводных телекоммуникаций, изучения особенностей пространственно-временной связанности их характеристик в пространственных, угловых, временных и спектральных координатах, а также задачи формирования устойчивых сложно-структурированных пучков (англ. beam shaping), Данная работа попадает под второе направление и затрагивает вопросы исследования структуры вихревых пучков применительно к задаче разработки систем беспроводных телекоммуникаций.



ЛС — лазерная система, З1–З9 — зеркала, СД1–СД2 — светоделители, Г — ТГц генератор, МК — набор модуляционных компонент для формирования вихревого пучка, Ф — набор светофильтров, ЛЗ — линия оптической задержки, ФП — полуволновая фазосдвигающая пластинка, Л1–Л4 — линзы, Г1–Г2 — поляризационные призмы, ЭОК — электро-оптический кристалл, ПЗС — матричный фотоприемник, ПК — блок управления макетом

**Рис. 1.** Схема экспериментального макета импульсной ТГц голографии для исследования динамики распространения вихревых пучков

## 2. Установка импульсной ТГц голографии

В данном докладе представлен экспериментальный макет импульсной ТГц голографии, применяемый для определения динамики распространения широкополосных пучков импульсного ТГц излучения с орбитальным угловым моментом. На рисунке 1 представлена принципиальная схема установки импульсной ТГц голографии. Черной рамкой выделен детектирующий модуль, спроектированный и изготовленный в виде цельного устройства с применением методов 3Д-печати.

В качестве источника фемтосекундного излучения использовалась титан-сапфировая лазерная система с регенеративным усилителем Regulus 35F1K (ООО «Авеста-Проект», Россия), создающая лазерные импульсы с центральной длиной волны 800 нм, длительностью менее 35 фс, энергией 2,3 мДж, с частотой повторения 1 кГц. Излучение направлялось зеркалами З<sub>1</sub> и З<sub>2</sub> в оптическую схему установки. Светоделитель СД 50/50 разделял луч на пробный, используемый в дальнейшем для регистрации ТГц излучения, и луч накачки, создающий ТГц излучение. Излучение накачки зеркалом З<sub>3</sub> и направлялось генератор терагерцового излучения TERA-AX (ООО «Авеста-Проект», Россия), работающий по методу оптического выпрямления

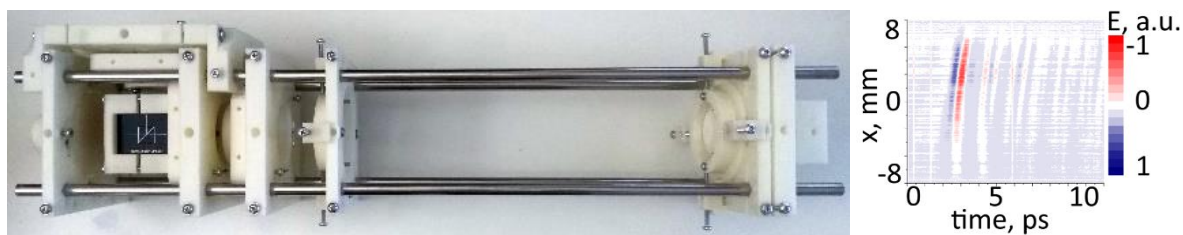


Рис. 2. Фотография практической реализации детектирующего модуля (слева) и пример измеренных статически-временных сечений ТГц поля (справа)

фемтосекундных импульсов в кристалле  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  с использованием наклонного волнового фронта для обеспечения фазового синхронизма. Центральная частота генерируемых импульсов 0,7 ТГц, спектральная ширина 1,5 ТГц, длительность импульсов меньше 1 пс, а энергия импульсов не менее 400 нДж. На выходе генератора располагался тефлоновый фильтр для отсекающего излучения накачки. ТГц излучение проходило систему зеркал и направлялось на электрооптический кристалл теллурида цинка ЭОК, где пересекалось с лучом пробного излучения. Пробный луч после светоделителя распространялся по своему пути, проходя систему зеркал, линию оптической задержки ЛЗ, набор светофильтров Ф, призму Глана — Тейлора Г<sub>1</sub>, выделяющую поляризованное излучение, отражается от светоделителя СД в системе детектирования и падает на электрооптический кристалл с противоположной для ТГц излучения стороны. Установка съюстирована таким образом, что оптические пути пробного пучка и пучка накачки от первого светоделителя до кристалла теллурида цинка равны. Это обеспечивало пересечение ТГц и фемтосекундного пробного импульса во времени. На кристалле нанесено просветляющее покрытие для длины волны 800 нм, что позволяет убрать многократные переотражения в видимого излучения в кристалле, что особенно важно измерения спектра ТГц излучения с помощью тонкого кристалла. Пробное излучение распространяется внутри кристалла и отражается от грани кристалла, являющейся первой, на которое падает ТГц излучение. После этого оба излучения: и ТГц, и пробное - синхронно распространяются внутри кристалла. Электрическое поле ТГц излучения посредством электрооптического эффекта Поккельса вызывает поворот поляризации излучения пробного пучка.

Система детектирования содержит широкоапертурный электрооптический кристалл и позволяет быстро измерять пространственное распределение ТГц поля. Детектирующий модуль состоит из электрооптического одноосного кристалла ZnTe, светоделителя, двух поляризаторов (представленных призмами Глана — Тейлора), телескопической системы и камеры. Печать осуществлялась по разработанным в САПР моделям на принтере Hercules из АВС пластика. Оптические элементы помещались в печатные узлы и объединялись в оптической клетке (рисунок 2, слева).

### 3. Расчет динамики распространения вихревых полей

Метод импульсной ТГц голографии, помимо возможности экспериментального исследования сверхширокополосных ТГц волновых полей, позволяет также численно рассчитывать особенности динамики их распространения в зависимости от начальных условий. Последние результаты работы в этом направлении можно найти, в публикациях [1-2].

#### Заключение

В данной работе был представлен макет установки импульсной ТГц голографии, содержащий систему детектирования терагерцовых сложно-структурированных волновых полей, собранную из оптомеханических узлов, изготовленных методами 3Д-печати. Макет может применяться для детектирования сверхширокополосных ТГц вихревых пучков с орбитальным угловым моментом в задачах помехоустойчивой передачи данных.

#### Благодарность

Работа поддержана грантом РФФИ. Проект № 19-72-10147.

#### Список источников

- [1] **Kulya, M. S.** Vectorial terahertz pulse time-domain holography for broadband optical wavefront sensing / N. S. Balbekin, A. A. Gorodetsky, S. A. Kozlov, N. V. Petrov // Proc. of SPIE. — 2020. — Vol. 11279. — P. 112790D.
- [2] **Kulya, M. S.** Propagation dynamics of ultrabroadband terahertz beams with orbital angular momentum for wireless data transfer / B. V. Sokolenko, A. A. Gorodetsky, N. V. Petrov // Proc. of SPIE. — 2020. — Vol. 11307. — P. 113070J.