

Ю. Ю. Чопорова^{1,2}, М. Г. Власенко^{1,3}, В. В. Герасимов^{1,3}, Б. А. Князев^{1,3},
А. А. Никитин³, В. С. Черкасский³

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный технический университет
пр. Карла Маркса, 20, Новосибирск, 630092, Россия

³ Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: choporenok@ya.ru

ЗАПИСЬ ГОЛОГРАММ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ НА ЛАЗЕРЕ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ*

В статье описаны эксперименты по применению классических оптических методов голографии в терагерцовом диапазоне, выполненные на Новосибирском лазере на свободных электронах. Были реализованы две схемы записи. В качестве регистраторов изображения использовались матричный микроболометрический приемник и термочувствительный люминесцентный экран. Для голографии с опорным пучком был сконструирован модифицированный интерферометр Маха-Цендера. Голограммы, записанные в схеме с осевой симметрией, были восстановлены путем расчета интеграла Френеля-Кирхгофа.

Ключевые слова: цифровая голография, терагерцовый диапазон, лазер на свободных электронах.

Yu. Yu. Choporova, M. G. Vlasenko, V. V. Gerasimov, B. A. Knyazev,
A. A. Nikitin, V. S. Cherkassky

APPROACHING TERAHERTZ HOLOGRAPHY USING THE FREE ELECTRON LASER

Many experiments in the terahertz region have been performed using low-power shot-pulse wideband sources. Appearance of more intense monochromatic terahertz sources (quantum cascade lasers, free electron lasers) and terahertz image sensors enables the implementation of classical variants of optical techniques in the terahertz range. In this paper we describe a series of experiments to demonstrate feasibility of classic holography at the terahertz range using the Novosibirsk free electron laser. Two imaging techniques have been applied for digital hologram recording. A modified Mach-Zehnder interferometer has been fabricated for recording the reference-beam holograms. In-line holograms have been recorded and reconstructed

Keywords: digital holography, free electron laser, terahertz region.

Введение

Освоение терагерцового диапазона частот, длительное время сдержавшееся из-за отсутствия источников и подходящих приемников излучения, началось на рубеже 80-х

и 90-х годов прошлого столетия после изобретения широкополосных импульсных источников на основе фемтосекундных лазеров. В качестве приемников и источников использовались либо фотопроводящие антенны [1], либо электрооптические кристал-

* Данная работа частично поддержана госконтрактом № 02.740.11.0556 Министерства образования и науки РФ и грантом 09-02-12158-офи-м Российского фонда фундаментальных исследований.

лы [2]. Крайне малая длительность импульса и очень малая средняя мощность, приводят к ряду ограничений, которые не позволяют решить ряд задач, доступных для классических оптических методов исследования. Целый ряд методов, хорошо известных для оптического диапазона, до сих пор не реализован и даже не исследован в терагерцовом диапазоне.

После запуска мощного Новосибирского лазера на свободных электронах [3], генерирующего перестраиваемое по частоте монохроматическое когерентное терагерцовое излучение открылась возможность для перенесения в этот диапазон классических оптических методов исследования.

Экспериментальная установка

Лазер на свободных электронах (ЛСЭ) генерирует излучение с перестройкой по длине волны от 120 до 235 мкм на первой очереди и от 40 до 80 мкм для второй очереди. Мощность излучения на рабочей станции составляет 50-150 Вт. ЛСЭ генери-

рует излучение в виде последовательности импульсов, длительность которых зависит от длины электронного пучка и отстройки резонатора. Средняя длительность импульса Новосибирского ЛСЭ составляет около 100 пс, что соответствует длине светового пуга порядка 30 мм. Оптическая разность хода для наблюдения интерференционной картины не должна, следовательно, превышать это значение. С учетом этих особенностей был сконструирован модифицированный интерферометр Маха-Цендера (рис. 1, а). Этот вариант объединяет в себе сдвиговой интерферометр и интерферометр Майкельсона. Терагерцовый пучок делится на лавсановых светоделителях в пропорциях в зависимости от угла падения излучения [4]. При использовании пучков с s-поляризацией (ТЕ-волна) и увеличении угла падения на лавсановые светоделители свыше 45° интенсивность в плечах интерферометра почти выравнивается, хотя из-за дополнительного отражения в плече с движущимся зеркалом точное выравнивание недостижимо.

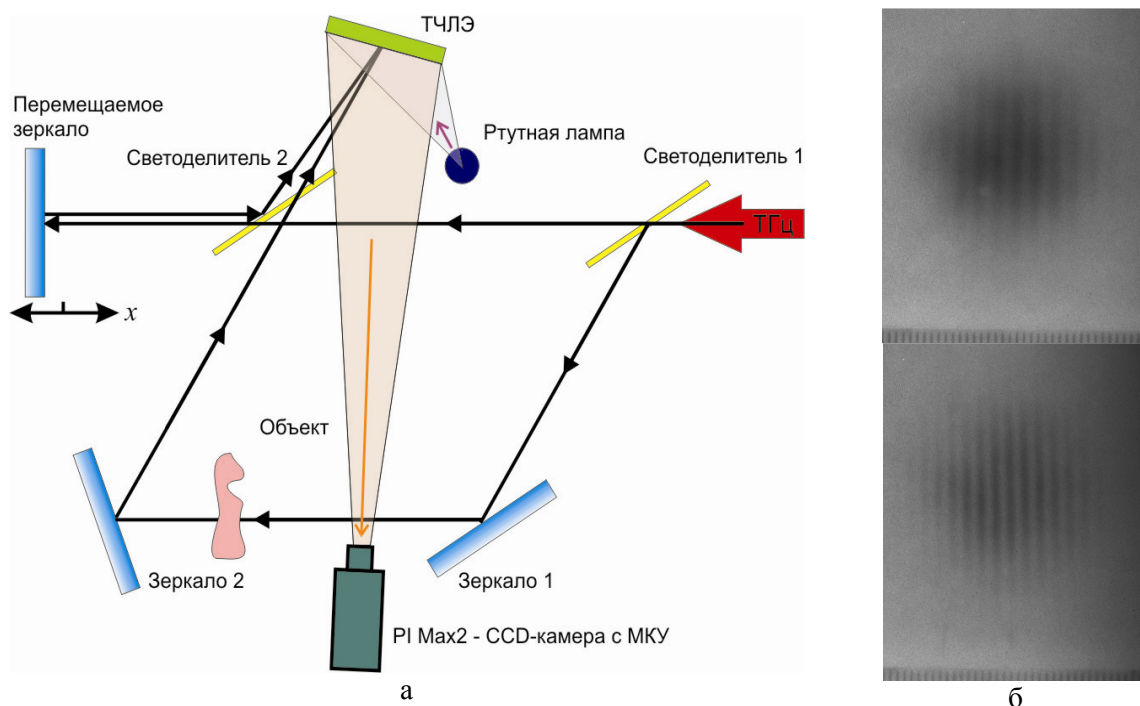


Рис. 1. Схема экспериментов по записи голограмм с опорным пучком. Регистратором терагерцового излучения служил термочувствительный люминесцентный экран (а). Интерференционные картины в схеме Маха-Цендера без объектов (б)

Запись изображений в терагерцовом диапазоне является не простой задачей. Из недавно разработанных регистраторов терагерцовых изображений для наших целей подходят матричный микроболометрический приемник [5] и термочувствительный люминесцентный экран [6].

Неохлаждаемый матричный микроболометрический приемник (ММБП) представляет собой матрицу из полупроводниковых болометров размером 320×240 элементов и позволяет записывать терагерцовые изображения с частотой около 25 кадров в секунду. Этот приемник очень чувствителен и имеет пространственное разрешение близкое к волновому пределу, однако малый физический размер матрицы (16.32×12.24 мм) ограничивает его возможности при записи голограмм большого размера. Большой динамический диапазон ММБП позволяет использовать его для записи голограмм сильно поглощающих объектов. В данных экспериментах ММБП был использован для измерения длины когерентности ЛСЭ, которая по полуширине корреляционной кривой оказалась равной 16 мм.

Набор из восьми термочувствительных люминесцентных экранов (ТЧЛЭ) размером 76×76 мм, имеющих разные чувствительности, постоянные времени и пространственные разрешения (табл. 1), хорошо подходит для записи голограмм большого размера. При освещении ртутной лампой экран люминесцирует в оранжевой области спектра. При освещении экрана инфракрасным или терагерцовым излучением он нагревается, и интенсивность люминесценции в нагретых областях падает из-за ее температурного тушения.

Калибровка ТЧЛЭ [6] показала, что отклик системы на интенсивность падающего излучения остается линейным вплоть до величины тушения 50-60%. Чувствительность экранов в терагерцовой области спектра ниже, чем в ИК из-за отражения излучения от

экрана. Постоянная времени экрана, имевшего достаточную чувствительность для использования в описанных ниже экспериментах, равнялась 0.15 сек при пространственном разрешении – четыре линии на мм. Экраны с более высокими характеристиками имеют недостаточную чувствительность. Запись картин тушения люминесценции осуществлялась ПЗС камерой Princeton Instruments PI Max2 с микроканальным усилителем яркости и матрицей размером 1024×1024 элемента.

Используя описанную выше систему, были проведены эксперименты по записи голограмм по схеме с опорным пучком. Различные амплитудные и амплитудно-фазовые объекты помещались в одно из плеч интерферометра Маха-Цендера. Достигалось максимальное перекрытие световых пучков и максимальная контрастность интерференционной картины, перемещением подвижного зеркала. На интерферограмме опорного и предметного пучков в отсутствие объектов (Рис. 1б) видно, что пучки образуют интерференционную картину с прямыми полосами и разной частотой полос. Угол между интерферирующими пучками может быть 0.1 радиан или меньше, что является ограничением пространственного разрешения голограммы. В схеме Маха-Цендера также может быть реализована голография с фазовым сдвигом. Смещения порядка доли длины волны можно добиться, используя простой линейный актуратор, имеющий микрометрическую точность. Это существенно облегчает реализацию схем с фазовым сдвигом в субмиллиметровом диапазоне.

Вторым вариантом голографической системы, которая представляет интерес в терагерцовом диапазоне является Габоровская схема осевой голографии. Эта схема в нашем случае представляет особый интерес, поскольку она очень проста, и при ее использовании длины когерентности лазерно-

Таблица. 1. Характеристики Термочувствительных люминесцентных экранов

Номер экрана	5	6	7	8
Время отклика (с)	0.06	0.15	.2	1.0
Разрешение (1/мм)	4	2	4	0.64

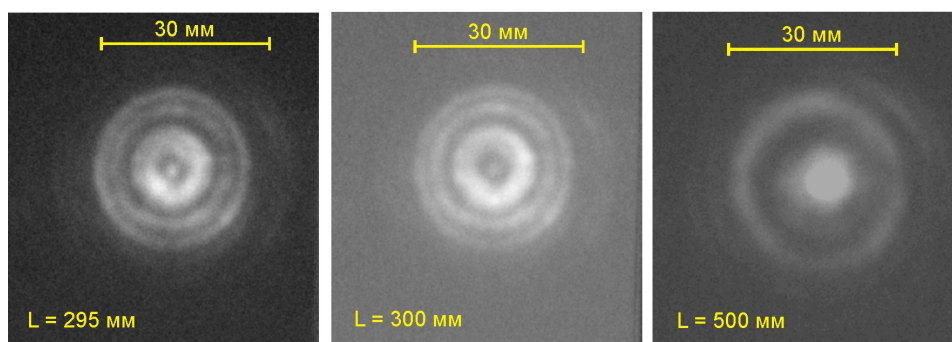


Рис. 2. Голограммы, записанные при разных расстояниях фторопластового кольца толщиной 3 мм и диаметром отверстия 5.5 мм

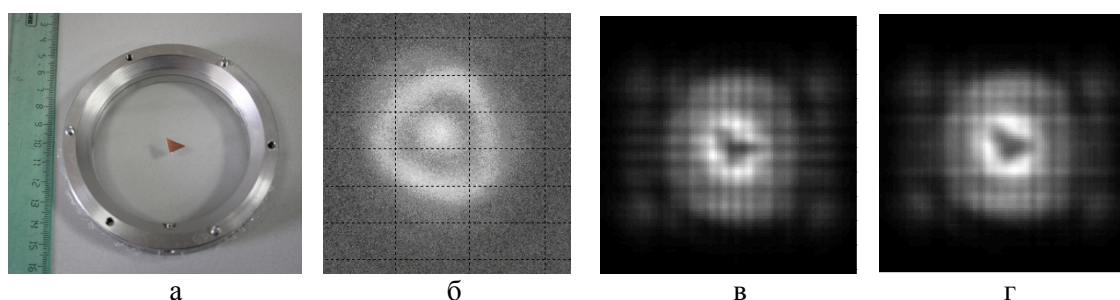


Рис. 3. Амплитудный объект (а), одна из 20 голограмм, записанных со скоростью 4 кадра в секунду (б), восстановление одной голограммы (в), результат усреднения пяти восстановленных голограмм (г)

го импульса достаточно для получения голограммы большого размера с высокой видимостью. Дополнительным стимулом явилось то, что в последнее время появились предложения по новым алгоритмам восстановления осевых голограмм, которые могут оказаться полезными в условиях малого числа разрешаемых элементов, что характерно для терагерцовых изображений, записанных на пределе волнового разрешения. Пример осевой голограммы, записанной с помощью ТЧЛЭ, приведен на рис. 2, на котором показаны также и результат усреднения восстановленного изображения по пяти индивидуальным голограммам.

Осевые голограммы амплитудных объектов были восстановлены путем решения интеграла Френеля-Кирхгофа,

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \frac{\exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho\right)}{\rho} \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta\right) dx dy, \quad (1)$$

которое сводилось к вычислению быстрого преобразования Фурье.

Как видно из рис. 3, усреднение восстановленных голограмм приводит к уменьшению высокочастотного шума и соответственно улучшению изображения.

Выводы и заключение

Выполненные эксперименты показали, что при использовании монохроматического излучения лазера на свободных электронах с длиной когерентности 15-20 мм и полной пространственной когерентностью по волновому фронту, в терагерцовом диапазоне могут быть реализованы две классические голографические схемы – схема с опорным пучком и осевая схема. Продемонстрировано, что для записи голограмм можно использовать как матричный микроболометрический приемник, так и термочувствительный люминесцентный экран. Зарегистрированы голограммы амплитудных и амплитудно-фазовых объектов. Выполнено восстановление голограмм, записанных по схеме с осевой симметрией.

Список литературы

1. *Auston D. H., Cheung K. P., Smith P. R.* Picosecond photoconducting Hertzian dipoles. *Appl. Phys. Lett.* 45, 284, 1984.

2. *Auston D. H., Nuss M. C.* Electrooptical generation and detection of femtosecond electrical transients. *IEEE J. Quant. Electronics*, 24, 184, 1988.

3. *Knyazev B. A., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A.* Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements. *Measurement Science and Technology*, V. 21, 054017, 13p. 2010

4. *В.В.Герасимов, Б.А.Князев, П.Д.Рудыч, В.С.Черкасский.* Френелевское отражение в оптических элементах и детекторах для терагерцового диапазона, Препринт ИЯФ 2006-023, Новосибирск, 2006 (in Russian)

5. *Dem'yanenko M.A., Esaev D.G, Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A.* Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser. *Appl. Phys.Lett.*, V. 92, 131116, 2008

6. *В.А. Кнызев, V.V. Kubarev.* Wide-field imaging using a tunable terahertz free electron laser and a thermal image plate. *Infrared Physics and Technology*, V. 52, 14, 2009

14.09.2010