

УДК 535.4+535-14

ЗАПИСЬ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОСЕВЫХ ГОЛОГРАММ АМПЛИТУДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Ю. Ю. Чопорова^{1,2}, М. Г. Власенко^{1,2}, В. В. Герасимов^{1,2}, Т. Н. Иргалин²,
Б. А. Князев^{1,2}, В. С. Черкасский²

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН;

² Новосибирский госуниверситет, г. Новосибирск, Россия

Эксперименты по голографии в терагерцовом диапазоне частот до настоящего времени проводились только с высоким временным разрешением и использованием широкополосных импульсных источников. В настоящей работе исследована возможность реализации классических методов голографии в этой спектральной области с использованием мощного монохроматического излучения. В качестве последнего использовался Новосибирский лазер на свободных электронах. Голограммы амплитудных объектов, т. е. транспарантов, записывались с помощью термочувствительного люминесцентного экрана и ПЗС-камеры, работающей в видимом диапазоне частот, при длине волны 130 мкм по осевой (габоровской) схеме. Восстановление голограмм выполнялось методом вычисления интеграла Френеля–Кирхгофа. Качество восстановленных изображений улучшалось при использовании стандартного метода суммирования нескольких индивидуально восстановленных голограмм. При этом достигаемое пространственное разрешение составило 0,4 мм.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение терагерцового диапазона частот, длительное время сдерживавшееся из-за отсутствия источников и подходящих приёмников излучения, началось на рубеже 80-х и 90-х годов прошлого столетия после изобретения широкополосных импульсных источников на основе фемтосекундных лазеров [1]. Ожидается, что излучение терагерцовой спектральной области будет широко использоваться в биологии, медицине, микроэлектронике и системах безопасности. Во многих применениях необходима регистрация изображений в терагерцовом диапазоне частот. Одним из методов регистрации является голография. До настоящего момента в терагерцовой области спектра она была реализована в рамках техники «спектроскопии высокого временного разрешения», которая кардинально отличается от методов классической голографии. Подробное описание этой техники, которую, в отличие от обычной голографии в «пространственном домене», можно назвать голографией во «временном домене», содержится в [2]. Насколько нам известно, классические схемы голографии в терагерцовом диапазоне частот до настоящего времени реализованы не были.

Первые оптические голограммы были записаны Габором в 1948 году [3–5]. При их получении излучение, рассеянное объектом, создавало предметную волну, а опорная волна представляла собой часть излучения, прошедшую через объект без изменения направления. Голограммы, полученные таким способом, называют осевыми. Здесь разность хода предметной и опорной волн и требования к средствам регистрации минимальны, что позволяет использовать источники с низкой когерентностью. Однако при освещении голограммы Габора волны $+1$ и -1 порядков дифракции образуют действительное и мнимое изображения объекта, которые находятся на одной оси. При наблюдении изображений, формируемых голограммой Габора, дифрагированные волны и волна, прошедшая голограмму без дифракции, накладываются друг на друга и создают взаимные помехи. По этой причине голография Габора не получила широкого распространения.

Устранить наложение изображений можно несколькими способами. В оптической области при большой длине когерентности лазерного источника можно реализовать схему Лейта и Упатниекса [6] с внеосевым опорным пучком, что позволяет пространственно разнести оба изображения и опорную волну. Хорошо разработанная в видимом диапазоне элементная база позволяет также реализовать запись линзовых голограмм Фурье. В терагерцовом диапазоне частот отсутствовали источники с достаточно большой длиной когерентности и достаточной средней мощностью излучения. Реализация в этой спектральной области внеосевых схем была затруднена также из-за отсутствия подходящих оптических элементов и средств регистрации с высоким пространственным разрешением.

В настоящей работе приведены результаты экспериментов по записи и восстановлению голограмм, получаемых по схеме Габора с использованием лазера на свободных электронах [7] в качестве источника излучения терагерцового диапазона частот.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки, в которой был использован Новосибирский лазер на свободных электронах [7], приведена на рис. 1. Излучение лазера представляет собой непрерывную последовательность 100-пикосекундных импульсов, следующих с частотой повторения 5,6 МГц. Длина его волны может плавно перестраиваться в широком диапазоне от 120 до 235 мкм на первой очереди и от 40 до 80 мкм на второй очереди. Все описанные далее эксперименты проводились при длине волны $\lambda = 130$ мкм. Излучение поступало на рабочую станцию по транспортному каналу длиной 16 м, заполненному сухим азотом для предотвращения его поглощения парами воды. На выходе транспортный канал отделялся от атмосферного воздуха полипропиленовым окном с толщиной 40 мкм.

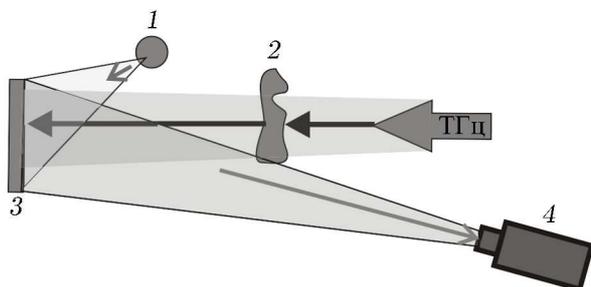


Рис. 1. Схема установки для записи осевых голограмм в терагерцовом диапазоне частот и фотографии транспарантов № 1 и № 2: 1 — ртутная лампа, 2 — объект, 3 — термочувствительный люминесцентный экран, 4 — ПЗС-камера

Для записи голограмм использовалась комбинация термочувствительного люминесцентного экрана из набора экранов Macken Instruments, Inc. [8] и ПЗС-камеры с усилителем яркости Princeton Instruments PI Max2 с размером матрицы 1024×1024 элементов. Люминесцентный экран имеет относительно низкую чувствительность к излучению терагерцового диапазона частот [9], но размер экрана 76×76 мм позволяет записать картину дифракции на объектах без потери высоких порядков дифракции и, следовательно, обеспечить более качественное восстановление голограммы.

Люминесцентный экран, освещаемый ртутной лампой, люминесцирует в оранжевой области спектра. Падающее излучение терагерцового диапазона частот нагревает экспонируемые обла-

Поперечное распределение интенсивности выходящего из транспортного канала пучка хорошо аппроксимируется гауссовой функцией вида $I(r) = \exp(-2r^2/w^2)$, где радиус пучка $w = 9$ мм. Излучение линейно поляризовано под углом 18° к вертикали. Поскольку длина когерентности определяется длиной цуга и равна примерно 30 мм, в поперечном сечении пучок полностью пространственно когерентен.

Запись голограмм осуществлялась по схеме Габора, т. е. по схеме осевой голографии. В качестве объектов использовались амплитудные транспаранты, представлявшие собой металлические пластинки с толщиной 100 мкм с фигурными отверстиями, вытравленными химическим методом.

сти экрана, и интенсивность люминесценции в нагретых областях падает пропорционально росту локальной температуры. Отклик экрана на интенсивность падающего излучения остаётся линейным вплоть до величины тушения 50÷60% (см. [10]). В экспериментах мы использовали два наиболее чувствительных экрана № 7 и № 8. Их разрешающая способность в инфракрасном диапазоне, согласно данным производителя, составляет 4 и 0,64 пар линий на мм соответственно. Запись изображений экрана, представляющую собой серию из 20 кадров, проводилась со скоростью 4 кадра/с. Записанное таким образом изображение ещё не является голограммой. Для её получения в цифровом виде следует выполнить несколько простейших математических операций с изображениями экрана, записанными до и после экспонирования. Процедура обработки данных подробно описана в [10].

2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

После первичной обработки данных, позволяющей преобразовать фотографию тушения люминесценции в стандартную цифровую голограмму, изображение восстанавливалось с использованием методики, описанной в [11]. Цифровая голограмма «освещалась» плоской волной, и дифракция света на апертуре, в данном случае голограмме, рассчитывалась с помощью интеграла Френеля–Кирхгофа

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

где $R(x, y)$ — амплитуда опорной плоской волны, $h(x, y)$ — функция пропускания голограммы,

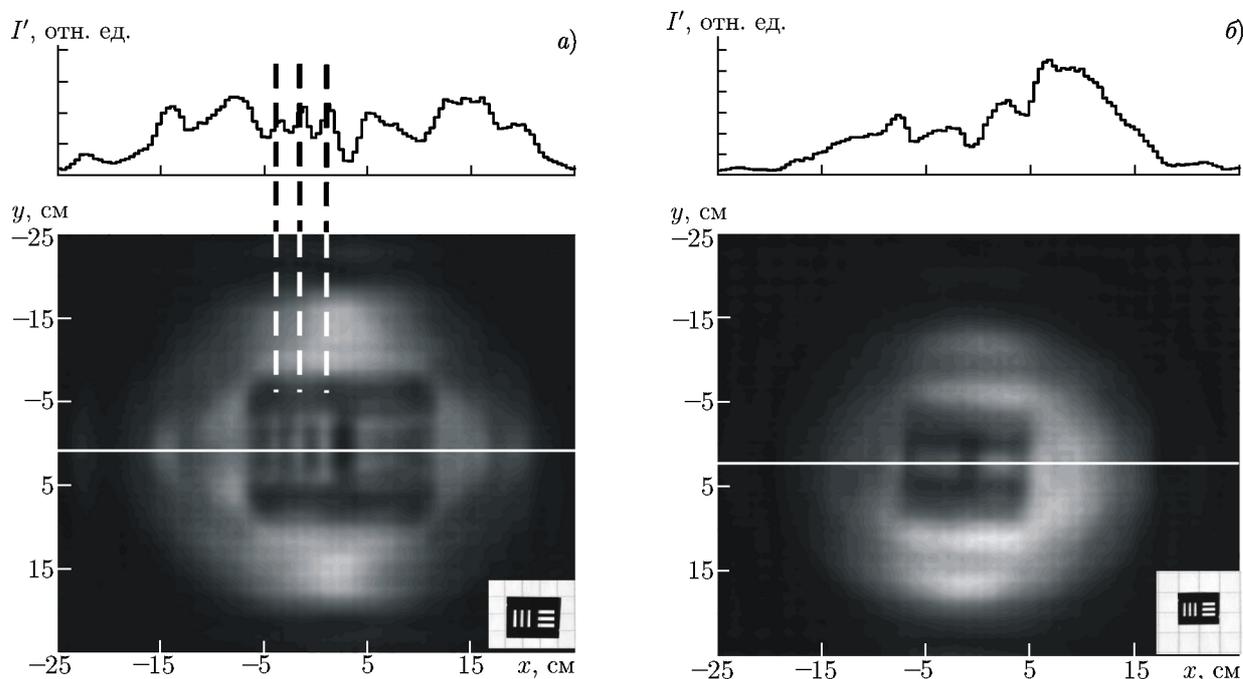


Рис. 2. Восстановленные изображения транспарантов № 1 (а) и № 2 (б); масштаб сетки равен 5 мм. На графиках приведены распределения интенсивности I' в зависимости от координаты x при фиксированной координате $y = 0$

d — расстояние до плоскости изображения. Для вычислений была написана программа в математическом пакете Matlab. Вычисление интеграла в выражении (1) выполнялось с использованием дискретного быстрого преобразования Фурье. Область, занимаемая голограммой на термочувствительном люминесцентном экране, проецировалась объективом на матрицу ПЗС-камеры. Для определения шага дискретизации голограммы экспериментально находилось расстояние на голограмме, которому соответствовало расстояние между двумя соседними пикселями. Эта величина определяла частоту Найквиста проводимого преобразования

$$\nu_N = 1/(2 \Delta x), \tag{2}$$

где Δx — шаг дискретизации в мм/пиксель. В наших экспериментах разрешение матрицы ПЗС-камеры на несколько порядков превышало разрешающую способность термочувствительного люминесцентного экрана. Поэтому качество восстановленного изображения лимитировалось разрешающей способностью экрана.

Распределение интенсивности вычислялось возведением в квадрат модуля амплитуды волны и давалось формулой

$$I(\xi, \eta) = |\Gamma(\xi, \eta)|^2. \tag{3}$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

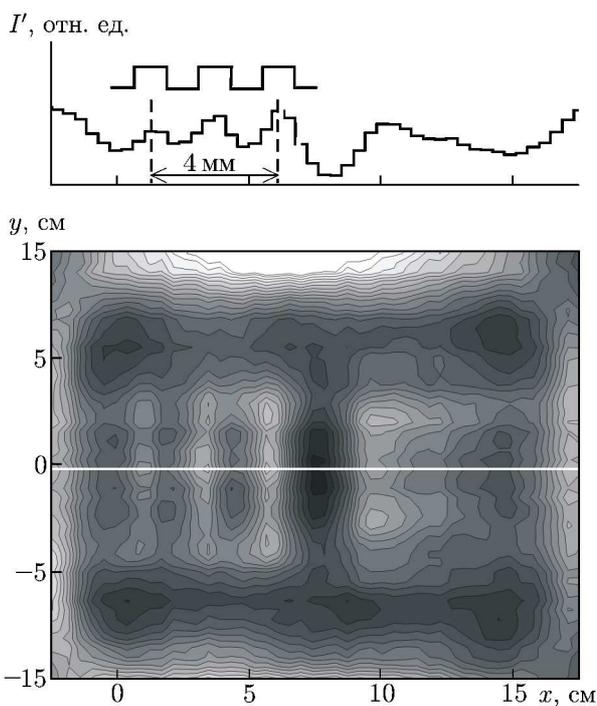


Рис. 3. Восстановленное изображение транспаранта № 1. Меандр, полпериода которого составляют 2,75 пиксела, соответствует ширине прорезей транспаранта 1 мм. На графике приведено распределение интенсивности I' в зависимости от координаты x при фиксированной координате $y = 0$ при большом числе усреднений повышается, см., например, изображение перегородки между второй и третьей щелями на рис. 4.

Для нахождения величины пространственного разрешения были записаны голограммы двух одинаковых по форме, но разных по размеру амплитудных транспарантов, см. рис. 2, из которых больший (с размерами 15×12 мм) имел ширину прорезей 1 мм и период 2 мм, а меньший (с размерами 8×10 мм) — ширину прорезей 0,5 мм и период 1 мм. Термочувствительный люминесцентный экран располагался на расстоянии 321 мм от объекта. Пространственное разрешение записанных голограмм ограничивалось разрешающей способностью используемого люминесцентного экрана, равной 0,25 мм, которая, в свою очередь, определялась поперечной теплопроводностью. В записанной голограмме один пиксель соответствует 0,08 мм. В восстановленном по голограмме изображении пространственное разрешение можно определить из рис. 3. Выделенные 11 пикселей изображения соответствуют 4 мм. Таким образом, частота дискретизации в восстановленной голограмме равна 0,4 мм.

Качество восстановленных изображений повышается, если использовать метод суммирования нескольких индивидуально восстановленных голограмм. Это связано с тем, что контраст распределения интенсивности в поперечном сечении

На рис. 5 показано восстановленное изображение более сложного объекта с размером 10×7 мм, представлявшего собой комбинацию из пяти соединённых в виде буквы «X» квадратных отверстий с длиной сторон 2,3 мм. Транспарант перекрывал значительную часть пучка, и хотя, строго говоря, условие Габора малой площади непрозрачных объектов [13] в этом случае не выполнялось, но, как видно, изображение восстанавливалось достаточно хорошо.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе реализованы классические голографические методы с использованием монохроматического излучения лазера терагерцового диапазона частот на свободных электронах. Впервые показано, что для записи голограмм в этой спектральной области можно использовать термочувствительные люминесцентные экраны.

В экспериментах, описанных в данной статье, при численном восстановлении голограмм амплитудных объектов достигнуто пространственное разрешение 0,4 мм при длине волны излучения лазера на свободных электронах 0,13 мм.

Запись голограмм выполнялась в режиме реального времени со скоростью 4 кадра в секунду. Поскольку восстановление голограмм можно выполнить в автоматическом режиме в реальном времени, то данные результаты показывают, что классические голографические методы в терагерцовой частотной области могут быть использованы для контроля промышленной продукции

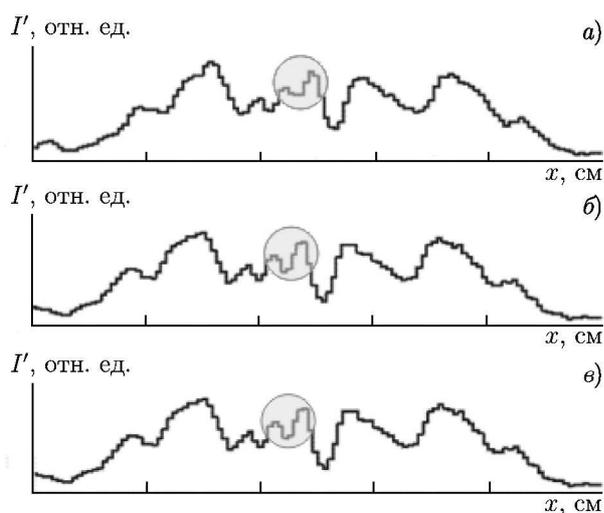


Рис. 4. Распределения интенсивности в поперечном сечении восстановленных изображений как функции координаты x при $y = 0$ с одной голограммы (а) и результаты усреднения по 5 (б) и 15 (в) отдельно восстановленным голограммам

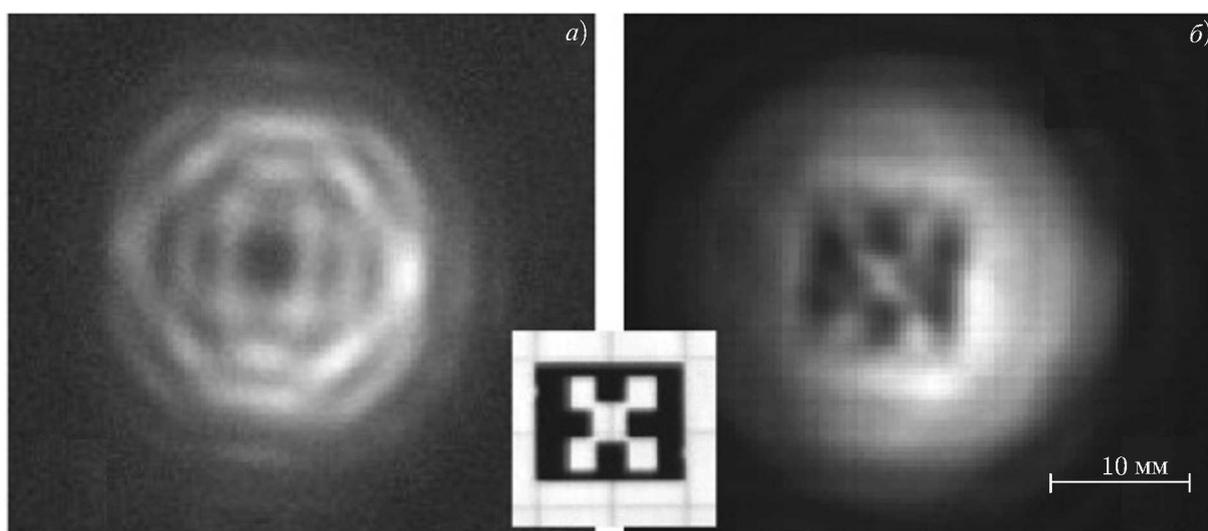


Рис. 5. Голограмма маски с квадратными прорезями, расположенными в виде буквы «X» (а), и восстановленное изображение (б). Размер сетки на фотографии маски равен 5 мм

и в системах безопасности, в т. ч. внутри контейнеров, не прозрачных для видимого света, но прозрачных для излучения этого спектрального диапазона.

Мы благодарим Г. Н. Кулипанова и Н. А. Винокурова за поддержку работы, а также Я. В. Гетманова, В. В. Кубарева, Т. В. Саликову, О. А. Шевченко и М. А. Щеглова, обеспечивавших работу Новосибирского лазера на свободных электронах при выполнении экспериментов, описанных выше. Мы благодарим также Сугил Ли (Dr. Sugil Lee, VIEWORK CO., Ltd.) за изготовление транспарантов.

Работа частично поддержана РФФИ (гранты 09–02–12158–офи–м, 09–02–12121–офи–м), а также Сибирским отделением Российской академии наук (интеграционный грант 89–2009). Работа выполнена при использовании оборудования ЦКП СЦСТИ в рамках госконтракта 16.552.11.7044.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Auston D. H., Cheung K. P., Valdmanis J. A., Kleinman D. A. // *Phys. Rev. Lett.* 1984. V. 53. P. 1555.
2. Wang S., Zhang X.-C. J. // *Phys. D.* 2004. V. 37. P. R1.
3. Gabor D. // *Nature.* 1948. V. 161. P. 777.
4. Gabor D. // *J. Appl. Phys.* 1948. V. 19. P. 1191.
5. Gabor D. // *Proc. Roy. Soc. A.* 1949. V. 197. P. 454.
6. Leith E., Upatnieks J. // *J. Opt. Soc. Am.* 1963. V. 53. P. 1377.
7. Knyazev B. A., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A. // *Measurement Sci. Techn.* 2010. V. 21. Art. no. 054017.
8. www.macken.com/thermal.shtml.
9. Knyazev B. A., Cherkassky V. S., Choporova Yu. Yu., et al. // *J. Infrared, Millimeter Terahertz Waves.* 2011. V. 32. P. 1207.
10. Knyazev B. A., Kubarev V. V. // *Infrared Phys. Techn.* 2009. V. 52. P. 14.
11. Schnars U., Jueptner W. *Digital Holography. Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques.* Springer, 2005.
12. Князев Б. А., Черкасский В. С. // *Вестник НГУ. Сер. Физика.* 2008. Т. 4, вып. 4. С. 74.
13. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. *Оптическая голография.* М.: Мир, 1973. С. 58.

Поступила в редакцию 2 сентября 2011 г.; принята в печать 28 сентября 2011 г.

RECORDING AND RECONSTRUCTION OF IN-LINE HOLOGRAMS OF AMPLITUDE OBJECTS IN THE TERAHERTZ RANGE USING A FREE ELECTRON LASER

*Yu. Yu. Choporova, M. G. Vlasenko, V. V. Gerasimov, T. N. Irgalin, B. A. Knyazev, and
V. S. Cherkassky*

Until now, holography experiments in the terahertz frequency range have been performed using only pulsed broadband sources and the time domain imaging technique. In this paper, we study the feasibility of the classical holographic technique in this spectral region using the Novosibirsk free electron laser as a high-power monochromatic terahertz source. Holograms of amplitude objects (metal masks) were recorded with the help of a temperature-sensitive phosphor image plate and a CCD camera operated in the visible range. Gabor (in-line) holograms were recorded at a wavelength of 130 μm . The holograms

were reconstructed by the Fresnel – Kirchhoff integral calculation in the image plane. Contrast of the images increased when several individually reconstructed holograms were summarized in a standard way. Spatial resolution of the reconstructed images was 0.4 mm.