

УДК 535.4+535-14

ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА МОЩНОМ ТЕРАГЕРЦОВОМ ЛАЗЕРЕ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

*Н. А. Винокуров^{1,2}, С. А. Жигач², Б. А. Князев^{1,2}, А. В. Коньшева³,
Г. Н. Кулипанов¹, Л. А. Мерзиевский⁴, И. А. Польских¹, В. С. Черкасский²*

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

² Новосибирский государственный университет;

³ Новосибирский государственный технический университет;

⁴ Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Для фокусировки монохроматического когерентного излучения 400-ваттного терагерцового Новосибирского лазера на свободных электронах разработаны отражательные дифракционные оптические элементы. Исследованы характеристики двух типов отражающих киноформных линз. Создана квазиоптическая система по схеме Теплера для исследования деформации плёнок и твёрдых тел с регистрацией терагерцового излучения термочувствительным люминесцентным экраном. Создана система для терагерцовой радиоскопии объектов в реальном времени с регистрацией изображения матрицей микроболометров. Исследованы свойства изображений предметов, полученных с помощью матрицы микроболометров при их освещении плоской волной и диффузным излучением. Показано, что спекл-картина, возникающая во втором случае, может быть усреднена путём вращения рассеивателя.

ВВЕДЕНИЕ

Визуализация изображений в диапазоне частот $1 \div 10$ ТГц (что соответствует длинам волн от 300 до 30 мкм) представляет значительный интерес для биологических исследований, медицинской диагностики, исследования материалов, систем безопасности и многих других приложений [1]. Наибольшие успехи в этом направлении связаны с появлением спектроскопии высокого временного разрешения (time domain spectroscopy) [2, 3], а также с созданием ряда источников монохроматического излучения, например параметрических генераторов [4] и лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) [5]. Обзор состояния дел в области получения изображений в терагерцовом диапазоне дан в работе [6]. Вследствие крайне низкой мощности большинства существующих источников терагерцового излучения, лежащей в интервале от нановатт до милливатт, в подавляющем большинстве случаев изображение получают путём сканирования объекта через сфокусированный с помощью параболического зеркала луч терагерцового излучения. Характерное время сканирования составляет несколько десятков минут. Очевидно, что далеко не во всех приложениях это возможно и допустимо.

В последнее время появились источники излучения, обладающие существенно большей мощностью, которые позволяют пересмотреть подходы к визуализации терагерцового излучения и перейти к получению терагерцовых изображений в реальном времени с помощью квазиоптических систем. Одним из перспективных источников такого рода является квантовый каскадный лазер, на котором недавно достигнута мощность непрерывной генерации на длине волны $\lambda = 190$ мкм, равная 250 мВт [7]. К недостаткам этого лазера можно отнести невозможность перестройки длины волны и необходимость охлаждения до 117 К. Средняя мощность излучения недавно запущенного в Новосибирске терагерцового лазера на свободных электронах достигает нескольких сотен ватт [8].

В данной работе мы рассмотрим вопросы, связанные с визуализацией изображений с использованием мощных пучков терагерцового излучения.

1. ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ И МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Новосибирский лазер на свободных электронах генерирует непрерывную последовательность импульсов монохроматического когерентного излучения с длительностью порядка 100 пс, следующих с частотой 5,6 МГц. Длину волны излучения лазера можно плавно перестраивать в интервале от 120 до 235 мкм. В ближайшее время будет запущена вторая очередь лазера, в результате чего диапазон генерации будет расширен до 30 мкм. Диаметр пучка на рабочих станциях составляет $50 \div 80$ мм. Излучение лазера практически полностью линейно поляризованное.

На базе Новосибирского ЛСЭ создан центр коллективного пользования, на рабочих станциях которого ведутся (см. [9, 10]) эксперименты по физике, химии, биологии, аэродинамике, по исследованию свойств конденсированных сред, получению наноматериалов и по другим направлениям. Поскольку столь мощное излучение в терагерцовом диапазоне получено впервые, одной из приоритетных задач, от решения которой зависит успех многих других исследований, являлась разработка адекватных методов визуализации терагерцового излучения и создание квазиоптических систем.

Для визуализации мощного терагерцового излучения на Новосибирском ЛСЭ были применены три устройства, основанные на использовании теплового эффекта излучения: инфракрасный термограф СВИТ, регистрирующий распределение температуры по поверхности нагреваемого терагерцовым излучением экрана [11, 12], термочувствительный интерферометр Физо видимого диапазона, с помощью которого можно выполнять абсолютные измерения распределения плотности мощности терагерцового излучения, поглощаемого плоскопараллельной стеклянной пластинкой [13], а также измеритель распределения плотности мощности по тепловому тушению люминесценции [11, 12] при нагреве поверхности термочувствительного люминесцентного экрана фирмы «Macken Instruments». В самое последнее время к ним прибавилась матрица микроболометров [14] с размерами $8,2 \times 6,1$ мм (160×120 элементов, расположенных с шагом 51 мкм), ранее применявшаяся для получения изображений в среднем инфракрасном диапазоне [15, 16], которая также по сути является тепловым прибором, но обладает несравненно более высокой чувствительностью, чем упомянутые выше устройства. Частота съёмки с помощью матрицы в наших экспериментах достигала 90 кадров в секунду. Характеристики этой матрицы как регистратора терагерцового излучения будут описаны отдельно.

2. КИНОФОРМНЫЕ ЛИНЗЫ ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

В ведущихся и планируемых экспериментах [9, 10] по исследованию деформации и разрушения твёрдых тел, по радиоскопии биологических объектов и субстанций, по воздействию терагерцового излучения на потоки при сверхзвуковом обтекании тел [17] ключевым вопросом является управление лазерным излучением, включая его фокусировку и построение изображений. Использование для этой цели преломляющей оптики в случае мощного излучения не всегда возможно. Вследствие большого диаметра лазерного пучка толщина линз не может быть малой, а коэффициент поглощения даже наилучших материалов, например полиэтилена, в терагерцовом диапазоне несравнимо больше, чем в видимом диапазоне, что в ряде случаев приводит, как показал наш опыт, к их разрушению. В многоэлементных системах велики потери на поглощение и на френелевское отражение [18], особенно для материалов типа германия и кремния, имеющих большие

показатели преломления. Последний эффект приводит в ряде случаев к появлению интенсивных «паразитных» пучков, портящих изображение.

Поскольку коэффициент отражения металлов в терагерцовом диапазоне очень велик, использование в терагерцовом диапазоне отражающей оптики является предпочтительным. Уже простейшие плоские амплитудные отражающие зонные пластинки Френеля, как показано в [19, 20], достаточно хорошо фокусируют терагерцовое излучение. Их недостатком является малая дифракционная эффективность, которая не превышает десяти процентов. В данной работе мы опишем изготовленные нами фазовые дифракционные оптические элементы и некоторые созданные на их основе квазиоптические системы.

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) являются искусственными двумерными структурами, изменяющими в каждой точке своей поверхности фазу и амплитуду падающей на них электромагнитной волны и позволяющими сформировать пучки с заранее заданными свойствами. ДОЭ широко используются в видимом диапазоне спектра, в котором хорошо развиты компьютерные методы расчёта позволяют построить весьма сложные изображения [21–23]. Дифракционные элементы используются также в качестве антенн в области сантиметровых и дециметровых волн [24]. Характерные размеры структуры ДОЭ должны по порядку величины соответствовать длине волны излучения, поэтому при создании ДОЭ для оптического диапазона, как правило, используется фотолитография [25], тогда как в СВЧ диапазоне структуры имеют макроскопические размеры и их легко изготовить. В субмиллиметровом (терагерцовом) диапазоне характерный диаметр первой зоны Френеля составляет по порядку величины 10 мм, поэтому изготовление дифракционных элементов не представляет особого труда.

Имеется несколько причин, по которым применение ДОЭ может оказаться предпочтительным по сравнению, например, с обычными параболическими зеркалами. Во-первых, стоимость изготовления детали на станке с числовым программным управлением (ЧПУ), равно как и длительность процесса, примерно пропорциональна объёму удаляемого материала, который несравненно меньше в случае ДОЭ. Во-вторых, толщина ДОЭ может быть очень малой, что значительно облегчает проблему охлаждения при использовании элемента в мощном пучке излучения, которая во второй очереди Новосибирского ЛСЭ может достигать нескольких киловатт. В-третьих, в случае, если требуется сфокусировать излучение не в «точку», а в заранее заданный объём достаточно сложной конфигурации, как это требуется, например, в некоторых газодинамических экспериментах [17], то альтернативы ДОЭ вообще не существует.

Для освоения методик изготовления ДОЭ терагерцового диапазона и исследования их рабочих характеристик мы изготовили два киноформных, или френелевских, зеркала (далее по функциональному назначению мы будем их называть киноформными линзами). Обе линзы были спроектированы для работы на длине волны $\lambda = 130$ мкм, при которой их фокусное расстояние равно 250 мм. Они состоят из 37 зон с параболическим профилем, описываемым уравнением

$$h_m(x, y) = \frac{1}{2 \cos \theta} \left(\frac{x^2 \cos^2 \theta + y^2}{2(f - m\lambda/2)} + m\lambda \right), \quad (1)$$

где $m = 0, -1, -2, \dots, -(N-1), -N$ — номера зон, θ — угол падения излучения. Радиус первой зоны равен 8,06 мм. Заметим, что для френелевской линзы набег фазы на одной зоне составляет 2π , т. е. одна зона линзы соответствует двум зонам Френеля зонной пластинки.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КИНОФОРМНЫХ ЛИНЗ

Фотографии линз представлены на рис. 1. Первая линза (рис. 1а), осесимметричная, предназначалась для фокусировки излучения «почти назад» при углах падения $\theta = 5^\circ \div 10^\circ$, достаточ-

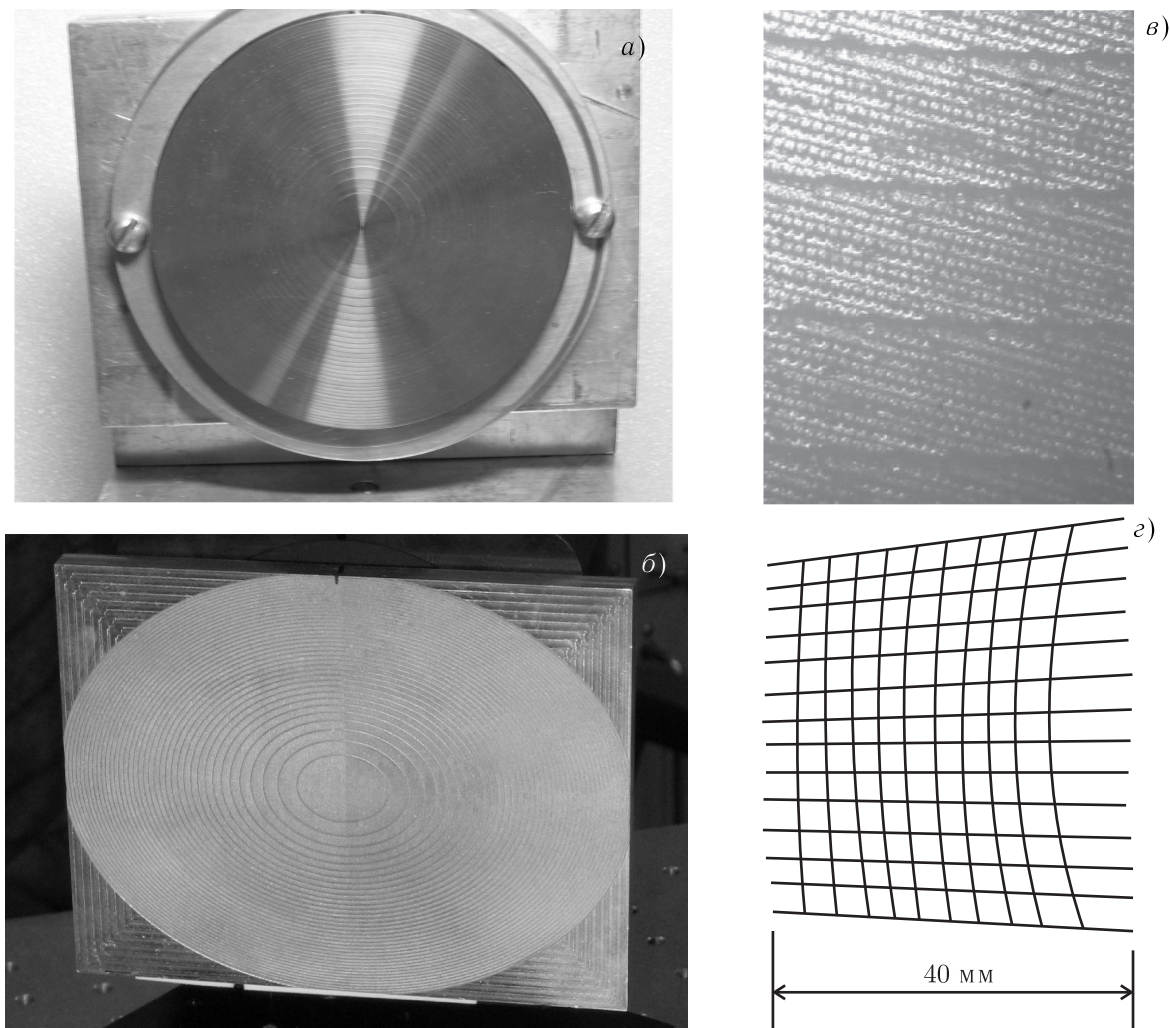


Рис. 1. (а, б) Отражательные киноформные линзы с параболическим профилем зон Френеля, расчётное фокусное расстояние 250 мм при $\lambda = 130$ мкм; (в) увеличенное изображение поверхности эллиптической киноформной линзы; (г) схема изображения прямоугольной проволочной решётки, полученного с помощью эллиптической киноформной линзы

ных, чтобы вывести отражённое излучение из падающего пучка без существенных aberrаций. Она была изготовлена на станке с ЧПУ методом алмазного точения и имеет достаточно гладкую поверхность.

Вторая линза (рис. 1б) была изготовлена для фокусировки излучения под углом 90° по отношению к падающему пучку. Она была изготовлена на станке с ЧПУ методом сверления алмазным конусом с закруглением на конце. Под микроскопом (рис. 1в) поверхность выглядит как упорядоченная решётка конических углублений с характерным размером неоднородности порядка шести микрон, что значительно меньше, чем $\lambda/10$. Известно [24], что для качественной фокусировки излучения под углом 90° наилучшим устройством являлся бы аналог внеосевого параболического зеркала с эллиптическими зонами Френеля

$$\left(\frac{x - c_m}{a_m}\right)^2 + \left(\frac{y}{b_m}\right)^2 = 1 \tag{2}$$

с полюсами (в наших обозначениях)

$$a_m = \frac{\sqrt{-m\lambda(f \cos^2 \theta - m\lambda/4)}}{\cos^2 \theta}, \quad b_m = |\cos \theta| a_m, \quad (3)$$

и центрами, смещёнными относительно друг друга на величину

$$c_m = \frac{-m\lambda \sin \theta}{2 \cos^2 \theta}. \quad (4)$$

Величины c_m и поправка под корнем в формуле (3) весьма существенны для миллиметровых и дециметровых волн, но в субмиллиметровом диапазоне для не слишком больших значений m и не слишком малых фокусных расстояний они значительно меньше, поэтому в качестве первого шага для отработки технологии изготовления ДОЭ для терагерцового диапазона мы изготовили линзу простейшим способом, «растянув» осесимметричную линзу в $\sqrt{2}$ раз по плоскости падения излучения, одновременно уменьшив высоту параболического профиля в соответствии с выражением (1).

Были проведены исследования качества фокусировки излучения терагерцового ЛСЭ с расходимостью излучения не более $3 \cdot 10^{-3}$ обеими линзами при $\lambda = 130$ мкм. Ранее [19] путём сканирования сечений пучка измерителем мощности ИМО-4С с малым входным отверстием для линзы № 2 (см. рис. 1б) было показано, что распределение интенсивности излучения вдоль оптической оси при длине волны 130 мкм хорошо соответствует расчётам. При увеличении длины волны положение максимума интенсивности, как и следовало ожидать, смещалось дальше от линзы, а сама интенсивность падала. При отклонении длины волны на $20 \div 25$ % от номинальной киноформная линза фокусирует излучение ещё достаточно хорошо, хотя область перетяжки заметно смещается. Ясно, что для работы в широком диапазоне длин волн требуется целый набор киноформных линз. Отсюда, кстати, следует, что киноформную линзу можно использовать для повышения спектральной чистоты широкополосного излучения в схеме оптической фильтрации с отверстием (аналогичный метод, в котором использовалась хроматическая аберрация обычной линзы, был реализован Р. Вудом).

Измеренный в [19] размер фокального пятна оказался шире, чем у идеального ДОЭ. Причину этого можно понять из представленной на рис. 2а подборки распределений интенсивности излучения в сечениях вблизи фокальной плоскости линзы (фокусное расстояние $f = 250$ мм).

Изображения сечения пучка были записаны с помощью матрицы микроболометров. Из-за большой мощности лазера и высокой чувствительности камеры при измерениях пучок ослаблялся почти в 10^4 раз с помощью фотолитографического поляризатора «P10 QMC Instruments», характеристики которого описаны в [26]. Видно, что при $h = f = 250$ мм линза данной конфигурации довольно неплохо фокусирует излучение в вертикальной плоскости (1,5 мм по полувысоте для самого яркого правого пятна и $0,6 \div 0,7$ мм для остальных при ожидаемой дифракционной расходимости порядка 0,6 мм). В горизонтальной плоскости пучок растянут на 6 мм, что свидетельствует о том, что при построении изображений пренебрегать поправкой c_m в (2) не следует. Действительно, если вычислить c_m из (4) для сороковой зоны зонной пластинки (что соответствует двадцатой зоне линзы), мы найдём, что соответствующий эллипс нужно было сместить на 3,7 мм. Взглянув на фокальное пятно при $h = 250$ мм на рис. 2, видим, что характерный размер растяжения фокального пятна по горизонтали, равный 4 мм, возникает вследствие пренебрежения поправкой c_m .

Несовершенство линзы сказывается также на качестве изображения. Для исследования дисторсии мы сделали два снимка регулярной проволочной решётки с шагом 3,5 мм, поместив её

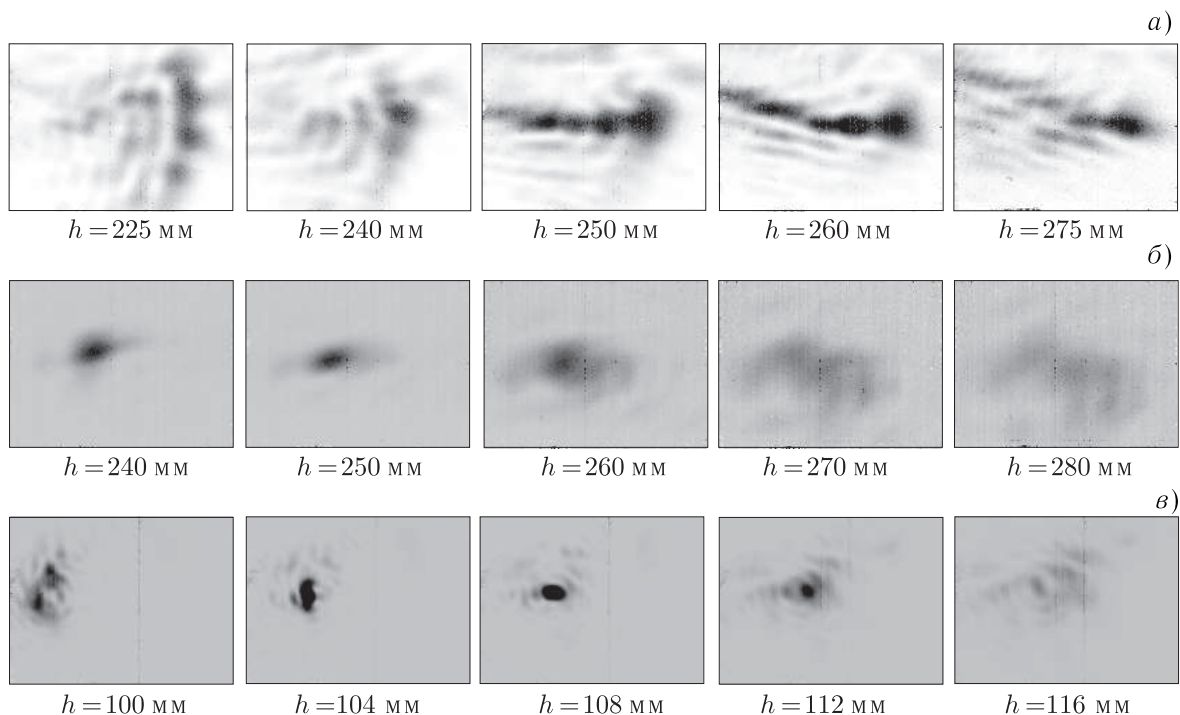


Рис. 2. (а) Изображения поперечного сечения пучка лазера на свободных электронах с длиной волны $\lambda = 130$ мкм в каустике эллиптической киноформной линзы на разных расстояниях h от линзы при угле падения излучения 45° ; (б) то же для осесимметричной киноформной линзы при угле падения излучения 8° ; (в) изображения поперечного сечения пучка вблизи фокуса полиэтиленовой линзы с фокусным расстоянием 108 мм. Изображения получены с помощью матрицы микроболометров

в предметную плоскость горизонтально и вертикально. На рис. 1г показано изображение координатной сетки на экране, полученное наложением в результате обработки снимков. Видно, что дисторсия не слишком велика и изображение, полученное с помощью киноформной линзы, легко может быть приведено к реальному масштабу.

Значительно более качественные изображения получаются с помощью осесимметричной киноформной линзы. Если установить её под малым углом к падающему лазерному пучку, то фокус и плоскость изображений окажутся в свободной области, где могут располагаться элементы оптической системы. Изображения сечения пучка в области перетяжки для этой линзы представлены на рис. 2б. Фокальное пятно в этом случае более симметричное, его полуширина равна 0,7 мм в вертикальном направлении и 1,1 мм — в горизонтальном, что близко к дифракционному пределу $\lambda f/d \sim 0,7$ мм, где d — диаметр линзы. Таким образом, оптические свойства отражающей киноформной линзы оказались не хуже, чем у обычной полиэтиленовой линзы с диаметром 40 мм (рис. 2в).

Заметим, что интенсивность неослабленного лазерного излучения в фокусе обеих линз весьма высока — там горят бумага, дерево и другие материалы и наблюдается свечение металлических лезвий. Из измерений отношения интегральных интенсивностей излучения до и после отражения от линзы № 2, выполненных с помощью термочувствительного люминесцентного экрана, было найдено, что дифракционная эффективность линзы равна $0,97 \pm 0,10$. При измерениях учитывалась поправка на поглощение терагерцового излучения атмосферным водяным паром.

4. СХЕМА ТЕПЛЕРА НА ОСНОВЕ КИНОФОРМНОЙ ЛИНЗЫ

Для исследования внутренней структуры и деформации прозрачных в видимом диапазоне материалов широко используются системы с оптической фильтрацией изображения, одной из которых является схема Теплера с ножом Фуко [27]. Реализация этого метода в терагерцовом диапазоне открыла бы возможность для интроскопии многих состоящих из неполярных молекул материалов, которые не прозрачны для видимого света и практически абсолютно прозрачны для рентгеновского излучения, но частично прозрачны для терагерцового излучения. Поскольку в настоящее время на НЛСЭ ведутся эксперименты [28] по исследованию деформации и разрушения плёночных материалов и твёрдых тел, нами была создана и протестирована квазиоптическая система Теплера (рис. 3).

Практически плоский волновой фронт излучения терагерцового лазера из транспортного канала, заполненного сухим азотом, проходит через исследуемый объект и, отражаясь от киноформной линзы, визуализируется на экране. Интенсивность входящего пучка может регулироваться с помощью поляризатора. Путь невозмущённого пучка показан серой заливкой. Объект и экран располагаются соответственно в предметной плоскости и плоскости изображений. Оранжевая люминесценция термочувствительного люминесцентного экрана, освещаемого ртутной лампой,

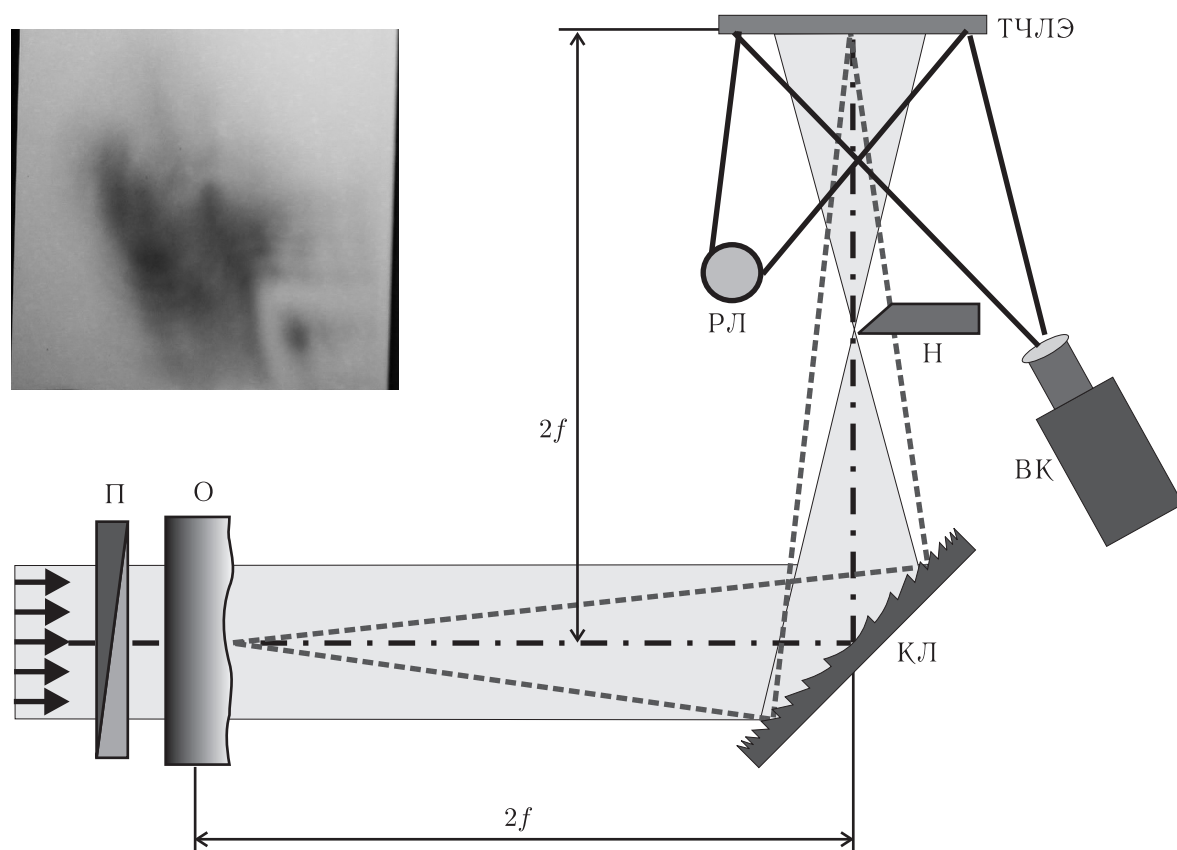


Рис. 3. Оптическая система, собранная по схеме Теплера, с терагерцовым лазером на свободных электронах в качестве источника излучения: П – фотолитографический поляризатор; О – объект (полиэтиленовая плёнка); КЛ – киноформная линза; Н – нож Фуко; ТЧЛЭ – термочувствительный люминесцентный экран; РЛ – ртутная лампа; ВК – видеокамера. На врезке – распределение интенсивности флуоресценции на экране при деформации плёнки

регистрируется с помощью видеокамеры. Распределение интенсивности терагерцового излучения на экране пропорционально уменьшению интенсивности люминесценции за счёт температурного тушения.

Деформацию объекта можно зарегистрировать, поместив в фурье-плоскости (фокус линзы) нож, блокирующий половину пучка. Ключевым моментом, определяющим чувствительность и динамический диапазон системы, является размер фокального пятна линзы. Если установить лезвие ножа горизонтально, то, благодаря относительно небольшой ширине фокального пятна (рис. 2а), можно использовать обе киноформные линзы. При вертикальном положении лезвия мы использовали только линзу № 1. Если потребуется расширить динамический диапазон, то перед объектом можно дополнительно установить рассеиватель терагерцового излучения. На рис. 3 слева приведена фотография свечения экрана, полученная при исследовании механически нагруженной полиэтиленовой плёнки. Она позволяет восстановить распределение поперечного градиента оптической толщины пленки $\int \nabla n dl$ для терагерцового излучения. Результаты этих экспериментов будут опубликованы отдельно.

5. ТЕРАГЕРЦОВАЯ РАДИОСКОПИЯ

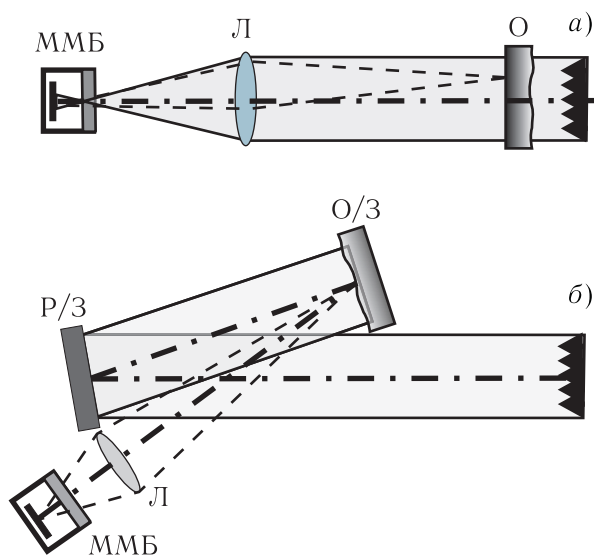


Рис. 4. (а) Система для изображающей терагерцовой радиоскопии объектов и (б) получение изображений объектов при их направленном и диффузном освещении терагерцовым излучением: О — объект; З — плоское зеркало; Л — полиэтиленовая линза; Р — рассеиватель; ММБ — матрица микроболометров

Другим способом, представленным на рис. 4а, является отображение плоскости, в которой находится объект, на регистратор терагерцового излучения с помощью линзы.

В данных экспериментах мы использовали полиэтиленовую линзу ($f = 54$ мм, $d = 40$ мм), поскольку при регистрации излучения матрицей микроболометров интенсивность излучения не должна быть большой. На рис. 5а представлено теневое изображение гайки, которая была выбрана в качестве модельного объекта для первоначального исследования характеристик изображающих систем. Матрица имеет широкий динамический диапазон, который в условиях наших

Для исследования внутренней структуры и химического состава частично прозрачных для терагерцового излучения объектов перспективным является метод терагерцовой радиоскопии («тераскопии»). Одним из примеров применения этого метода является исследование содержимого запечатанных конвертов или картонных коробок в системах безопасности [4], в том числе запрещённых или опасных химических и биологических субстанций. Другими возможными применениями могут быть томография объектов, контроль влажности содержимого в технологических процессах и др.

Нами были исследованы несколько схем радиоскопии объектов с терагерцовым ЛСЭ в качестве источника. Вследствие большой длины волны зондирующего излучения, при безлинзовой (теневого) радиоскопии изображение представляет собой ярко выраженную дифракционную картину, которая требует специальных методов для восстановления изображения объекта. В частности, для восстановления структуры прозрачных объектов одним из таких методов является габо-

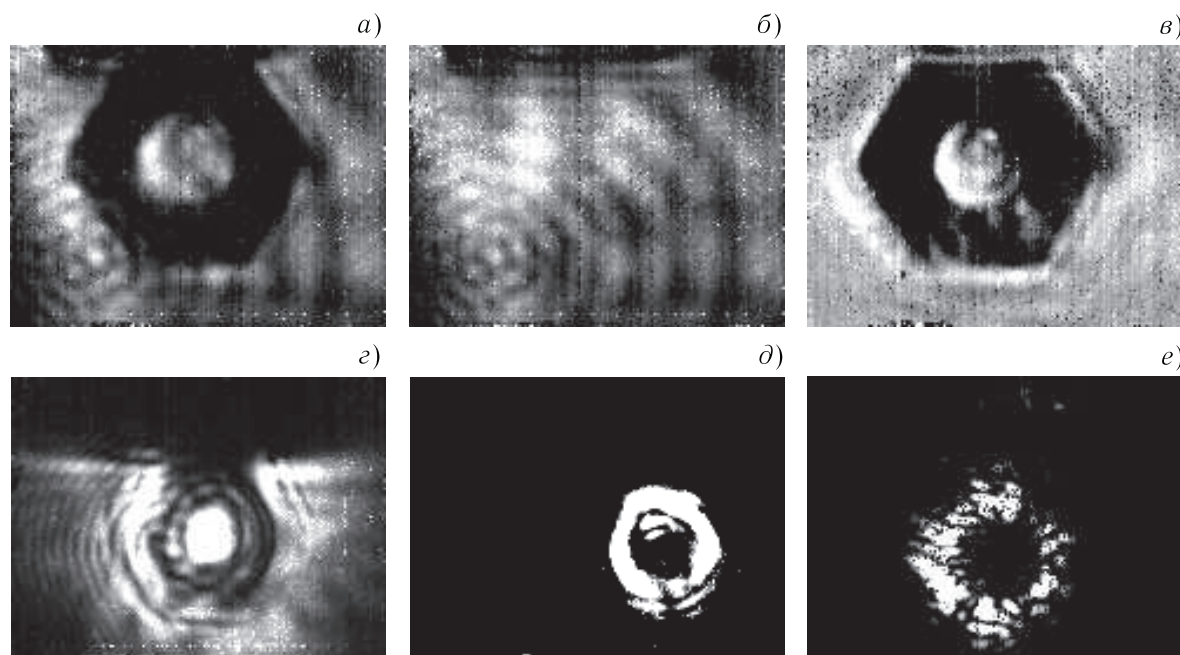


Рис. 5. (а–в) Поле падающего излучения и изображения тестового объекта (металлическая гайка) в случае радиоскопии; (г) радиоскопическое изображение объекта, помещённого в бумажный конверт; (д) изображение в отражённом свете при направленном лазерном освещении; (е) изображение объекта при диффузном освещении. Уменьшение оптической системы для изображений а–в составило 1 : 5, для изображений г–е — 1 : 7,5

экспериментов можно оценить величиной порядка 200. Уменьшение оптической системы составляло $M = 1 : 5$, длина волны излучения 130 мкм. В изображении поля падающего на объект излучения (рис. 5б) видны концентрические кольца, которые можно связать с многолучевой интерференцией в германиевом входном окне матричного приёмника. Программная компенсация неоднородности поля улучшает качество изображения (рис. 5в). Характерный размер размытия границы объекта (от 0,1 до 0,9 по относительной интенсивности) составляет 0,5 мм при дифракционном пределе 0,3 мм.

Рисунок 5г представляет теневое изображение гайки, помещённой в почтовый конверт ($M = 1 : 7,5$). В этом случае размытие границ объекта составляет 0,3 мм при дифракционной расходимости 0,2 мм. Видно, что терагерцовая радиоскопия позволяет обнаруживать скрытое содержимое. Перестраиваемость излучения Новосибирского ЛСЭ позволяет различать и более тонкие свойства предметов, о чём свидетельствует следующий эксперимент. Из фторопластового порошка были спрессованы три таблетки, две из которых содержали аминокислоты с отличающимися спектрами поглощения. Радиоскопия этих таблеток при трёх длинах волн позволила однозначно определить, какая из аминокислот находится в таблетке.

6. ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ, ОСВЕЩАЕМЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Наряду с теневой радиоскопией имеется не менее важное приложение — визуализация изображений предметов, освещаемых терагерцовым излучением. Насколько известно авторам, экспериментов подобного рода в терагерцовом диапазоне в реальном времени до сих пор не проводилось. Поскольку излучение Новосибирского ЛСЭ обладает полной пространственной когерентностью,

возможны (см. рис. 4б) два варианта освещения — плоской волной и излучением, рассеянным на шероховатой поверхности («рассеивателя»).

В случае освещения хорошо отражающих объектов лазерным пучком с низкой расходимостью зеркало отражает пучок в направлении объекта, и на ММБ регистрируется изображение только тех частей поверхности, отблеск от которых в соответствии с законом Френелевского отражения попадает в апертуру линзы. Наш модельный объект имеет кольцевую плоскую поверхность с закруглёнными краями, поэтому при тщательной подгонке положения гайки мы регистрируем только светящееся кольцо (рис. 5д). Малейший сдвиг объекта приводит к исчезновению изображения.

При замене зеркала рассеивателем из медной фольги, на которой выдавлены случайно расположенные бугорки с размером больше длины волны, объект освещается диффузным пучком с большой расходимостью. В этом случае лучи, отражённые от всех частей передней поверхности объекта, достигают матрицы, однако вследствие высокой когерентности излучения изображение становится пятнистым (рис. 5е). В изображающих системах характерный размер спекла равен дифракционному размеру [29]

$$\delta = 1,22 \lambda b/d, \quad (5)$$

где b — расстояние от линзы до плоскости изображений. Средняя полуширина спеклов на изображении, равная 0,3 мм, в точности соответствует этой величине. При диффузном освещении всех предметов, от металлических до стеклянных, их изображение состояло из спеклов, размер которых менялся в соответствии с выражением (5). При вращении рассеивателя спекл-картина хаотически меняется, обегая всю поверхность предмета. Таким образом можно получить неискажённые изображения.

ВЫВОДЫ

Отражательные дифракционные оптические элементы имеют большие перспективы в качестве элементов управления мощным монохроматическим терагерцовым излучением. По сравнению с параболическими зеркалами они имеют малый вес и толщину, что облегчает их охлаждение. Путём компьютерных расчётов не представляет труда спроектировать ДОЭ со сложной заранее заданной конфигурацией фокального объёма, которые оказываются необходимы для решения некоторых задач.

Эксперименты показали, что отражательные киноформные линзы можно использовать в квазиоптических системах терагерцового диапазона. Может быть использован даже упрощённый вариант отражательной киноформной линзы, если не предъявляются очень высоких требований к качеству фокального пятна. Показано, что схема Теплера для визуализации оптических неоднородностей при деформации плёнок и твёрдых тел, собранная с использованием отражательной киноформной линзы и термочувствительного люминесцентного экрана (ТЧЛЭ), с хорошей точностью обеспечивает регистрацию распределения градиента оптической длины в прозрачном объекте с поперечными размерами 5×5 см. Динамический диапазон ТЧЛЭ при регистрации интенсивности люминесценции цифровой видеокамерой «Sony DCR-TRV230E» равен примерно тридцати.

Более широкий динамический диапазон (порядка 200) имеет регистратор терагерцового излучения на основе матрицы микроболометров. Хотя вследствие небольших размеров матрицы она не может быть использована в устройствах, требующих большого поля в плоскости изображений, благодаря высокой чувствительности ММБ в настоящее время является одним из самых перспективных устройств для визуализации терагерцовых изображений. Эксперименты показали,

что при когерентном освещении изображения шероховатых объектов будут иметь выраженную спекл-структуру, но высокая скорость съёмки позволит за счёт усреднения по кадрам преодолеть это затруднение.

Данная работа частично поддержана Интеграционными грантами СО РАН № 174/6 и № 22/6, грантом РФФИ № 07–02–13547, а также грантом РНП.2.1.1.3846 Министерства образования и науки РФ. Мы благодарим М. А. Демьяненко и Д. Г. Есаева, выполнивших регистрацию изображений с помощью матрицы микроболометров, В. В. Котенкова, В. В. Кубарева, А. Н. Матвеевко, Т. В. Саликову, С. С. Середнякова, О. А. Шевченко и М. А. Щеглова за помощь при проведении экспериментов и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siegel P. H. // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques. 2002. V. 50. P. 910.
2. Auston D. H., Cheung K. P., Smith P. R. // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 45. P. 284.
3. Xu L., Zhang X.-C., Auston D. H. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. P. 1784.
4. Kawase K., Ogawa Y., Minamide H., Ito H. // Semicond. Sci. Technol. 2005. V. 20. P. S258.
5. Uk J. Y., Kazakevitch G. M., Jin C. H., et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2005. V. A543. P. 90.
6. Mickan S. P., Zhang X.-C. // Int. J. High Speed Electronics and Systems. 2003. V. 13. P. 601.
7. Hu Q. // Proc. Joint 32nd Int. Conf. on Infrared and Millimetre Waves and 15th Int. Conf. on Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 2007. V. 1. P. 24.
8. Gavrilov N. G., Knyazev B. A., Kubarev V. V., et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2007. V. A575. P. 54.
9. Kulipanov G. N. // Proc. Joint 31st Int. Conf. on Infrared and Millimetre Waves and 14th Int. Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, 2006. P. 12.
10. Cherkassky V. S., Chesnokov E. N., Fomin V. M., et al. // Proc. Joint 32nd Int. Conf. on Infrared and Millimetre Waves and 15th Int. Conf. on Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 2007. V. 2. P. 636.
11. Cherkassky V. S., Knyazev B. A., Kubarev V. V., et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2005. V. A543. P. 102.
12. Cherkassky V. S., Gerasimov V. V., Ivanov G. M., et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2007. V. A575. P. 63.
13. Винокуров Н. А., Князев Б. А., Кулипанов Г. Н. и др. // Журн. техн. физ. 2007. Т. 91, № 7. С. 91.
14. Кныазев В. А., Демьяненко М. А., Есаев Д. Г. // Proc. Joint 32nd Int. Conf. on Infrared and Millimetre Waves and 15th Int. Conf. on Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 2007. V. 1. P. 360.
15. Демьяненко М. А., Овсяук В. Н., Шашкин В. В. и др. // Прикладная физика. 2005. Т. 6. С. 114.
16. Демьяненко М. А., Овсяук В. Н., Шашкин В. В., et al. // Proc. SPIE. 2005. V. 5957. Int. Congress on Optics and Optoelectronics. P. 340.
17. Коротаева Т. А., Фомин В. М., Яковлев В. И. // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2007. Т. 2, вып. 1. С. 19.
18. Герасимов В. В., Князев Б. А., Рудыч П. Д., Черкасский В. С. // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 4. С. 103.
19. Князев Б. А., Черкасский В. С. // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2007. Т. 1, вып. 2. С. 3.
20. Кныазев В. А., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A. // J. Korean Phys. Soc. 2007. V. 51. P. 409.
21. Методы компьютерной оптики / Под ред. В. А. Соифера. М.: Физматлит, 2003. 688 с.

22. Гончарский А. В., Попов В. В., Степанов В. В. Введение в компьютерную оптику: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1991. 312 с.
23. Пальчикова И. Г. Математическое моделирование и экспериментальные исследования каустик световых полей, дифрагированных на обобщённых зонных пластинках: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2000.
24. van Houten J. M., Herben M. H. A. J. // IEE Conf. Publ. 1995. Antennas and Propagation. V. 407. P. 97.
25. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. и др. // Автометрия. 1985. № 1. С. 4.
26. Cherkassky V. S., Knyazev B. A., Kulipanov G. N., et al. // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 2007. V. 28. P. 219.
27. Скотников М. Н. Теневые количественные методы в газовой динамике. М.: Наука, 1976. 160 с.
28. Князев Б. А., Кубарев В. В., Кулипанов Г. Н. и др. // Международная конф. «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны»: IX Харитоновские тематические научные чтения. 12–16 марта 2007 г., Саров. С. 312.
29. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.

Поступила в редакцию 3 июля 2007 г.; принята в печать 20 декабря 2007 г.

DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS AND QUASIOPTICAL SCHEMES FOR EXPERIMENTS ON A HIGH POWER TERAHERTZ FREE ELECTRON LASER

*N. A. Vinokurov, S. A. Zhigach, B. A. Knyazev, A. V. Konysheva, G. N. Kulipanov,
L. A. Merzhievsky, I. A. Polskikh, and V. S. Cherkassky*

We have developed reflective diffraction optical elements (DOE) for focusing monochromatic coherent radiation of 400 W terahertz Novosibirsk free electron laser (FEL). Operational characteristics of two modifications of the refractive kinoform lenses was studied. Quasi-optical Toepler system with terahertz radiation recording by a thermal image plate was fabricated for the study of film and solid deformation. A system for real-time terahertz radioscopy of objects with image recording by a microbolometer matrix (MBM) was fabricated. Images of objects illuminated by a plane wave or diffuse radiation were obtained by using the MBM. It is shown that the speckle pattern, which appears in the second case, can be averaged by means of the scatterer rotation.