

Генерация Бесселевых закрученных пучков в субтерагерцевом диапазоне с использованием отражающих дифракционных оптических элементов

В.В. Герасимов^{1,2}, Н.Д. Осинцева², В.С. Павельев^{3,4}, А.Н. Агафонов³

¹Новосибирский государственный университет,

630090, Россия, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 1;

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,

630090, Россия, Новосибирская область, г. Новосибирск, проспект Лаврентьева, д. 11;

³Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34;

⁴Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт»,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

Аннотация

Рассмотрен простой способ формирования закрученных Бесселевых пучков субтерагерцевого (субТГц) диапазона с орбитальным угловым моментом $l=1$ на основе отражающих металлических дифракционных оптических элементов с непрерывным спиральным микро-рельефом, изготовленных методом микрофрезерования на дюралевого полированной подложке и литьем из олова. Элементы были протестированы с помощью излучения лампы обратной волны (длина волны $\lambda=855$ мкм). Для элемента, изготовленного микрофрезерованием, пучки формировались и сохраняли Бесселев профиль интенсивности на расстоянии от отражающего элемента 20–50 мм, что хорошо согласуется с результатами численного моделирования. Экспериментальная оценка энергетической эффективности данного элемента составила 63%. Для элемента, изготовленного методом литья, пучки в области формирования имели искаженный профиль вследствие наличия остаточных деформаций олова, обладающего пластичностью. Благодаря высокой проводимости, металлические отражающие элементы могут использоваться при работе с источниками субТГц-излучения с высокой плотностью мощности, такими как лазеры на свободных электронах и гиротроны.

Ключевые слова: дифракционная оптика, субтерагерцевый диапазон, Бесселев пучок, закрученный пучок, отражающий дифракционный оптический элемент.

Цитирование: Герасимов, В.В. Генерация Бесселевых закрученных пучков в субтерагерцевом диапазоне с использованием отражающих дифракционных оптических элементов / В.В. Герасимов, Н.Д. Осинцева, В.С. Павельев, А.Н. Агафонов // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 3. – С. 334-341. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1410.

Citation: Gerasimov VV, Osintseva ND, Pavelyev VS, Agafonov AN. Generation of Bessel vortex beams in the subterahertz range using reflecting diffractive optical elements. Computer Optics 2024; 48(3): 334-341. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1410.

Введение

Существование Бесселевых пучков первого рода впервые теоретически было предсказано Дурниным в 1987 г. [1]. Они являются особым несингулярным решением скалярного волнового уравнения Гельмгольца в цилиндрических координатах. Достоинством таких пучков является свойство «бездифракционности» (т.е. сохранение профиля распределения интенсивности поля в поперечном сечении) в свободном пространстве на больших расстояниях, начиная с плоскости их формирования. Ограничения на область распространения связаны с конечностью диаметра освещающего пучка и апертуры элемента, преобразующего входное излучение в Бесселеву моду. Почти сразу Дурнин с соавторами экспериментально продемонстрировали свойства таких пучков в видимом диапазоне длин волн, создавая Бесселевы пучки нулевого порядка с помощью узкой кольцевой щели, помещенной в фокальную плоскость линзы

[2]. Впоследствии пучки, сохраняющие свой профиль сечения по мере распространения, назвали бездифракционными, одной из наиболее интересных разновидностей которых является Бесселева мода. Исследованию Бесселевых пучков и методов их генерации и детектирования в видимом диапазоне было посвящено много работ [3]. С точки зрения применений, интерес к бездифракционным пучкам вызван их использованием в системах получения изображений с большой глубиной фокуса [4], микроскопии, для оптической связи [3, 5] и усиления генерации в лазерах на свободных электронах (ЛСЭ) [6].

Бесселевы пучки первого и более высоких порядков обладают орбитальным угловым моментом (ОУМ) которому соответствует определенный топологический заряд моды пучка. Фаза электромагнитного поля в поперечном сечении такого пучка закручена, т.е. меняется в зависимости от азимутального угла и радиального расстояния, а в центре есть не-

определенность фазы (сингулярность) [7]. Помимо бездифракционности, закрученные Бесселевы пучки обладают свойством сохранять ОУМ, даже при распространении через амплитудно-фазовые неоднородности, что используется, например, в биомедицинских и телекоммуникационных приложениях [8, 9]. Большой практический интерес закрученные пучки представляют для кодирования информации в квантовых технологиях [10], для манипулирования микрочастицами (так называемые оптические пинцеты) [11], получения изображений, тестирования материалов [12], метрологии и астрономии [13].

Немаловажное значение для приложений закрученные Бесселевы пучки имеют и в терагерцевом (1–10 ТГц) и миллиметровом/субтерагерцевом (0,1–1 ТГц) спектральных диапазонах для создания изображающих систем и сенсорных устройств [14], неразрушающего тестирования объектов [15]. Ожидается, что использование Бесселевых пучков высоких порядков позволит расширить возможности систем беспроводной связи в окнах прозрачности миллиметрового диапазона длин волн [16]. Детальный обзор работ по теории и применению Бесселевых пучков с ОУМ в видимом и ТГц-диапазонах приведен в работе [17].

В 1999 г. впервые в миллиметровом диапазоне (на частоте 90 ГГц – нижняя граница субтерагерцевого (субТГц) диапазона) был получен Бесселев пучок нулевого порядка при пропускании Гауссова пучка, генерируемого диодом Ганна, через конический фазовый аксикон из прозрачного для данного диапазона полиэтилена [18]. Диаметр центрального пятна Бесселева пучка имел ширину 4 мм, что немного превышало длину волны излучения (3,3 мм). При этом длина бездифракционной области составляла более 70 мм, что намного превышало длину Релея Гауссова пучка (10 мм). Позднее Бесселевы пучки более высокого порядка были сгенерированы с помощью бинарных амплитудных голограмм [19], однако дифракционная эффективность таких элементов была невысока (не более 45%). Были предложены бинарные фазовые дифракционные оптические элементы (ДОЭ), рассчитанные с помощью стохастической оптимизации в рамках строгой теории, для создания Бесселевых пучков любого порядка с дифракционной эффективностью до 94% [20, 21], однако из-за сложного бинарного рельефа и высокого аспектного отношения его элементов, такие элементы на прозрачном в ТГц диапазоне материале (тефлон) авторам [20, 21] не удалось изготовить. Более простым и реализуемым способом создания бесселевого распределения поля с ОУМ явилось пропускание падающего пучка через плоскопараллельную пластинку из композитного материала с двумерным спиральным распределением эффективной диэлектрической проницаемости, формируемого круглыми субволновыми отверстиями разного диаметра [22]. С помощью данного метода получилось сформировать не только пучки с заданным ОУМ в миллимет-

ровом диапазоне, но и пучки с комбинацией нескольких ОУМ, за счет формирования на одной метапластинке нескольких типов распределений проницаемости, соответствующих определенному ОУМ.

С развитием техники 3D-печати стало возможным изготовление металинз, состоящих из ячеек субволнового размера разной толщины. За счет специально заданного распределения толщин таких ячеек на диэлектрической линзе удалось сформировать пучки с разными ОУМ [23]. Используя специальные методы оптимизации распределения таких ячеек в трехмерной структуре линзы, удалось получить Бесселевы пучки с ОУМ, имеющие область бездифракционности, начинающуюся не сразу после линзы, а в заданном отрезке расстояний от нее, что представляет большой интерес для развития субТГц беспроводных систем связи [24]. С помощью металинз, созданных по той же технологии, были сформированы закрученные пучки с топологическим зарядом +1 и –1, а также маски для их демультимплексирования [16].

На основе жидких кристаллов (ЖК), обладающих свойством двойного лучепреломления (от видимого до микроволнового диапазонов), в настоящее время активно разрабатываются устройства управления поляризацией излучения, модовым составом пучка, фильтры и четвертьволновые пластинки. Из-за малых потерь ЖК в субТГц-диапазоне и возможности изменения их оптической плотности механическим, оптическим, тепловым воздействием, а также электрическим полем, на основе ЖК разрабатываются различные субТГц модуляционные устройства [25, 26], в том числе и элементы, преобразующие излучение в Бесселевы пучки с ОУМ [27].

Несмотря на имеющийся опыт создания Бесселевых закрученных пучков в субТГц-диапазоне, разработанные методы [18–23, 27] ограничены небольшими мощностями излучения. Используемые диэлектрические материалы, несмотря на слабое поглощение, при достаточно мощных пучках способны деформироваться за счет теплового нагрева. Пучки большой мощности могут генерировать ЛСЭ [28] и гиротроны [29]. Последние могут использоваться в лидарных системах, для передачи информации на большие расстояния в окнах прозрачности субТГц-диапазона, а также имеют множество применений для построения изображающих и сенсорных систем, обработки материалов, спектроскопии [29]. Достаточной механической прочностью и стойкостью к большим плотностям мощности обладают ДОЭ, изготовленные литографическим травлением на подложках из высокоомного кремния или с помощью технологий лазерной абляции на алмазных поликристаллических пленках, прозрачных в ТГц- и миллиметровом диапазонах частот [30]. На основе высокоомного кремния было создано и апробировано множество различных дифракционных элементов для работы с высокой средней мощностью излучения (порядка сотен Ватт),

генерируемого Новосибирским ЛСЭ [31–33]. Однако при переходе в субТГц-диапазон, где длины волн достигают миллиметров, высота микрорельефа должна составлять сотни микрон, что трудно обеспечить при использовании методов литографии или абляции. Кроме того, кремний и синтетический алмаз обладают высокой оптической плотностью, что приводит к значительным френелевским потерям на отражение. Снизить френелевские потери можно с помощью нанесения на поверхность подложки дифракционного элемента просветляющего покрытия, что усложняет технологию изготовления и снижает лучевую стойкость отражающего элемента [34].

Наиболее подходящими для управления поперечно-модовой структурой мощных субТГц-пучков могут быть отражающие ДОЭ, изготовленные на металлической поверхности (обладающей в субТГц-диапазоне очень низкими тепловыми потерями при отражении [35]), на которой можно создавать достаточно глубокий микрорельеф при использовании простых методов механической обработки [36]. Одним из возможных применений отражающих металлических элементов является создание бездифракционных Бесселевых пучков для повышения эффективности генерации мощного лазерного излучения в вигглерах ЛСЭ [6].

В данной работе элементы для создания закрученных Бесселевых пучков субТГц-диапазона с орбитальным угловым моментом $l=1$ создавались микрофрезерованием с помощью ЧПУ на дюралево-полированной подложке либо литьем из олова. Данные элементы были протестированы на излучении лампы обратной волны (длина волны $\lambda=855$ мкм). Приведено сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования.

1. Изготовление отражающих дифракционных оптических элементов

Для изготовления фазовых спиральных отражающих ДОЭ с непрерывным рельефом было предложено две технологии – фрезерование и литье. Достоинством изготовления фрезерованием является доступность технологии и возможность использования более широкого спектра материалов, пригодных для механической обработки. К недостаткам данного метода можно отнести не очень высокую точность механической обработки поверхности, приводящую к повышенной шероховатости поверхности по сравнению с оптическими методами полировки и может привести к потерям мощности излучения на рассеяние. К преимуществам литья можно отнести сравнительно низкую стоимость единичного элемента и меньшую шероховатость поверхности, а к недостаткам — высокую стоимость оснастки и сравнительно более высокую погрешность формы элемента [37, 38]. Изготовление элемента (№1) методом фрезерования пластины из сплава Д16Т проводилось на микрофрезерном станке Proxxon MF70 (Германия) с использо-

ванием сферической твердосплавной фрезы диаметром 0,8 мм при скорости вращения шпинделя 20000 об/мин и скорости подачи 100 мм/мин. Для создания чистой траектории использовался собственный генератор G-кода станка, что позволило избежать внесения погрешностей формы, связанных с представлением модели в CAD/CAM-системах [36]. Для изготовления элемента (№2) литьем была отфрезерована литьева форма Д16Т, в которую производилось литье чистого олова (ЧДА) при температуре 300°C. Выбор олова в качестве материала для изготовления элемента обусловлен его относительно низкой температурой плавления и практически 100% (как и Д16Т) коэффициентом отражения в исследуемой области спектра. Температура после отливки снижалась до комнатной в течение 8 часов. После остывания производилась химическая и механическая обработка рабочей поверхности элемента с целью удаления механических примесей и оксидного слоя. Геометрические размеры рабочей поверхности элементов составляли 80 × 70 мм.

На рис. 1а и рис. 2а показаны фотографии отражающих элементов №1 и №2, предназначенных для формирования пучков с орбитальным угловым моментом $l=1$. На рис. 1б и рис. 2б показаны увеличенные изображения центральной части элементов, полученных на конфокальном микроскопе VHX-6000. На профиле сечений виден плавный перепад высот h , что характерно для непрерывного рельефа. Максимальный перепад составляет $h \approx 450 \pm 20$ мкм и несколько отличалось от расчетного значения высоты рельефа для угла падения освещающего пучка 45 градусов и рабочей длины волны. Периоды обеих дифракционных решеток по вертикали составляют $p_v = 2 \pm 0,1$ мм (что соответствует углу блеска решетки $\approx 13^\circ$), а по горизонтали в 1,7 раза больше $p_r = 3,4 \pm 0,1$ мм. Далее под периодом решетки мы будем подразумевать вертикальный период и обозначать его p . В центральной области апертуры оптических элементов наблюдаются определенные нарушения периодической структуры решетки, что оказывало влияние на работу элементов.

2. Численное моделирование

Бесселевы пучки, формируемые ДОЭ, образуются конически сходящимися волнами первого дифракционного порядка в области их перекрытия (рис. 3а). С целью сравнительного анализа разных подходов к формированию ТГц-пучков с ОУМ в настоящей статье результаты экспериментального исследования формирования Бесселева пучка с ОУМ с помощью отражающего элемента (рис. 1–2) сравнивались с результатами численного исследования формирования такого пучка с помощью пропускающего элемента [32]. При этом в моделировании предполагалось, что Бесселев пучок формируется пропускающим фазовым бинарным спиральным аксиконом [32] с параметрами (апертура, период, топологический заряд, длина волны освещающего пучка), соответствующими параметрам

изготовленных отражающих элементов. Отметим, что результаты экспериментов по формированию Бесселева пучка с ОУМ с помощью пропускающего фазового бинарного спирального аксикона и исследованию распространения сформированного пучка в свободном пространстве, ранее приведённые в [32], находятся в хорошем соответствии с результатами численного моделирования, выполненного тем же методом, что и в настоящей работе. Расчеты распределения интенсивности поля в сечении сформированных после ДОО пучков выполнялись на основе скалярной теории дифракции с помощью специально написанной программы в Matlab [39]. Предполагалось, что элемент освещался плоским Гауссовым пучком с длиной волны $\lambda = 855$ мкм и радиусом перетяжки $w = 22$ мм. На рис. 3б представлены распределения интенсивности в сечении пучка в плоскостях, отстоящих от элемента на расстоянии $L = 10 - 70$ мм. На рис. 3в показано распределение продольного сечения формируемого пучка. Параметры излучения и ДОО в расчетах соответствуют условиям эксперимента (см. параграф 3). Как видно на рис. 3б, пучок формирует Бесселево распределение, характеризующееся максимумами интенсивности в виде концентрических колец, начиная примерно с 20 мм, которое сохраняется вплоть до 40–50 мм, а при $L > 50$ мм Бесселев пучок расходится. В области $L = 40 - 60$ мм на расчетных распределениях интенсивности наблюдаются диагональные линии и квадраты, наличие которых связано с дифракцией излучения на апертуре оптического элемента, которая выбиралась квадратной в ходе численного моделирования. Согласно теории [40], в нашем случае Бесселев пучок должен «разваливаться» при $L_0 = w \times (p/\lambda) \approx 51$ мм, что хорошо согласуется с приведенными выше численными расчетами.

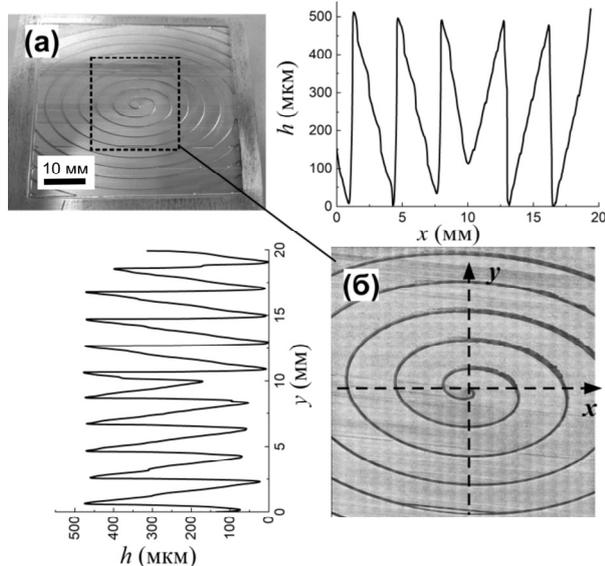


Рис. 1. Изображение отражающего ДОО №1: (а) фотография, (б) изображение центрального фрагмента апертуры элемента 20×20 мм² с горизонтальным и вертикальным профилем сечения, полученное на конфокальном микроскопе VHX-6000

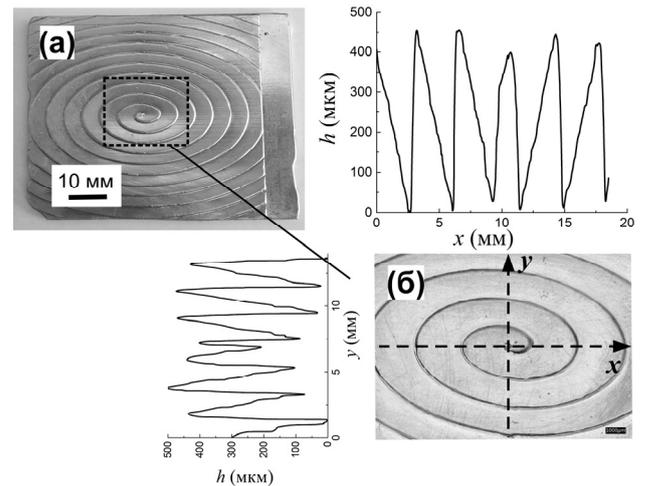


Рис. 2. Изображение отражающего ДОО №2: (а) фотография, (б) изображение центрального фрагмента апертуры элемента 20×20 мм² с горизонтальным и вертикальным профилем сечения, полученное на конфокальном микроскопе VHX-6000

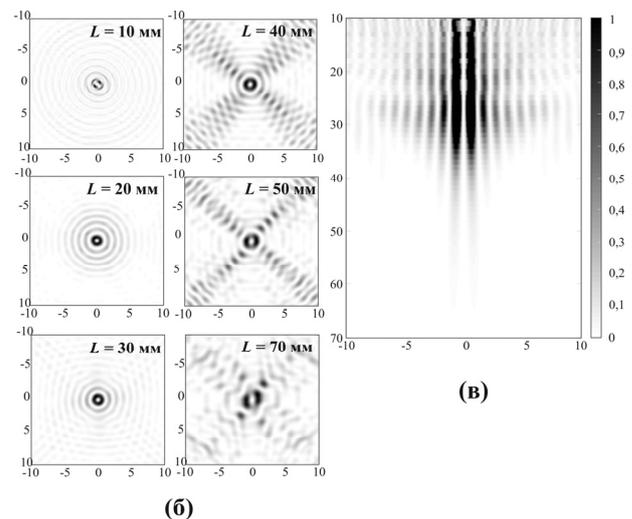
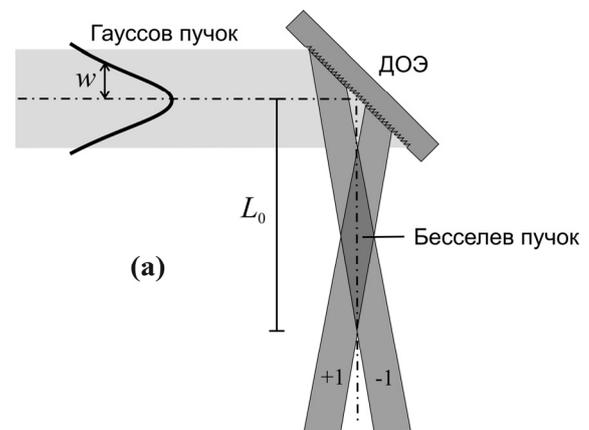


Рис. 3. (а) Схема формирования Бесселева пучка с помощью отражающего ДОО; (б) расчетные распределения интенсивности Гауссова пучка с длиной волны $\lambda = 855$ мкм и радиусом перетяжки $w = 22$ мм, формируемые аксиконном с периодом решетки $p = 2$ мм в плоскостях, отстоящих от элемента на расстоянии $L = 10 - 70$ мм; (в) распределение продольного сечения формируемого пучка

3. Эксперимент

В эксперименте в качестве источника излучения использовалась лампа обратной волны (ЛОВ) (производитель ИОФ РАН, Россия) [41], генерирующая непрерывное линейно поляризованное (99,99%) субТГц-излучение, перестраиваемое в диапазоне 0,06–1,5 ТГц (при использовании нескольких типов ламп) и имеющее ширину линии 10^{-5} от длины волны λ . Измерения проводились на частоте 0,351 ТГц ($\lambda = 855$ мкм), соответствующей максимуму спектральной яркости лампы. Средняя мощность на данной частоте составляла около 40 мВт.

Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 4. Излучение ЛОВ собиралось и коллимировалось полиэтиленовой линзой (L), а затем, пройдя через диафрагму (D) диаметром 45 мм, отражалось от металлического зеркала или отражающего ДОЭ. Профиль интенсивности отраженного пучка сканировался однопиксельным пироэлектрическим приемником с размером апертуры 2 мм. Шаг сканирования составлял 0,4 мм, который определял размер пикселя получаемых изображений.

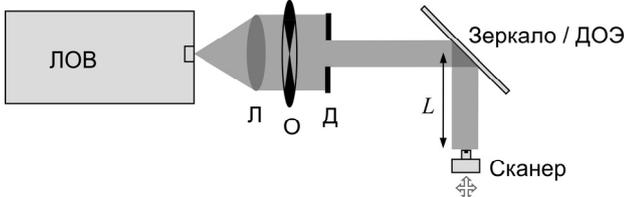


Рис. 4. Оптическая схема эксперимента:
 L – полиэтиленовая коллимирующая линза,
 O – obtюратор, D – диафрагма (40 мм)

Поскольку пироэлектрический детектор может регистрировать только переменный поток мощности, перед диафрагмой помещался механический obtюратор (O), модулирующий интенсивность излучения с частотой 10 Гц.

На рис. 5 показано сканированное изображение сечения пучка, отраженного от зеркала. Пучок имеет характерный Гауссов профиль с радиусом перетяжки $w = 22$ мм. В случае, когда на место зеркала устанавливали отражающий ДОЭ №1 (изготовленный методом микрофрезерования), то в отраженном пучке на расстоянии $L = 20 - 70$ мм от ДОЭ формировались распределения интенсивности, представленные на рис. 6. Видно, что при $L = 20 - 50$ мм изображения пучка имеют характерную осесимметричную кольцевую структуру с максимальной яркостью в первом кольце диаметром ≈ 3 мм. Эти результаты хорошо согласуются с результатами численных расчетов (рис. 3), несмотря на то что расчеты выполнялись для бинарного микрорельефа с аналогичными параметрами. При $L > 50$ мм пучок расходится, и профиль интенсивности перестает аппроксимироваться функцией Бесселя. Провести измерения на меньших расстояниях $L < 20$ мм, чтобы увидеть область, где пучок еще не

был сформирован, не было возможным из-за ограничений габаритных размеров детектирующей головки однопиксельного приемника.

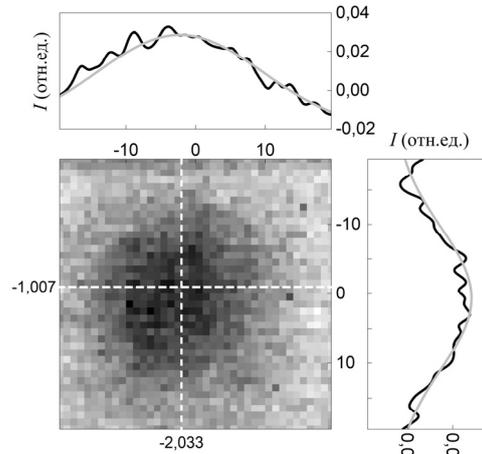


Рис. 5. Изображение поперечного сечения пучка, отраженного от зеркала, полученное на расстоянии 80 мм от него. Область сканирования – 40×40 мм², шаг сканирования – 1 мм. Серыми линиями показаны графики Гауссовой аппроксимации горизонтального и вертикального профилей сечения пучка

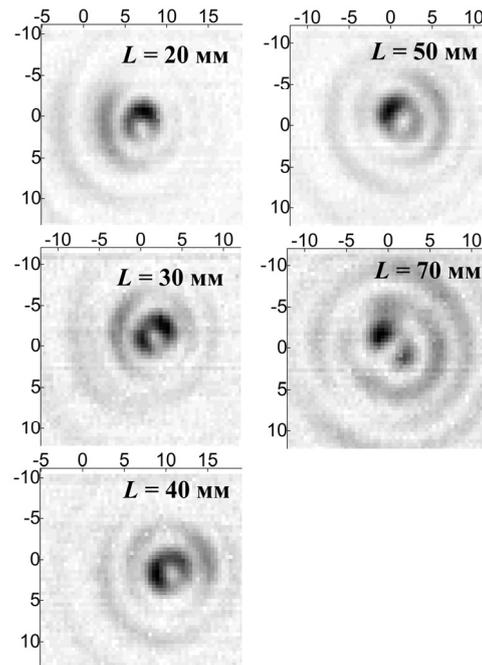


Рис. 6. Изображения поперечного сечения пучка, отраженного от ДОЭ №1 (изготовленного методом микрофрезерования), полученные на расстояниях $L = 20 - 70$ мм. Область сканирования – 24×24 мм², шаг сканирования – 0,44 мм

Энергетическую эффективность E_f дифракционного оптического элемента (которая в общем случае учитывает и его дифракционную эффективность, и возможные потери на рассеяние, поглощение и френелевское отражение (в случае элемента на пропускание)) можно оценить, как отношение суммарной интенсивности сформированного Бесселева пучка I_6 к

интенсивности излучения I_0 , падающего на элемент. Интенсивность Бесселева пучка в области формирования ($L=30-40$ мм) находилась суммированием сигнала по всему кадру (см. рис. 6) и составила $I_6 \approx 13$ отн. ед. Интенсивность падающего пучка вычислялась суммированием сигнала по площади сечения Гауссова пучка и составила $I_0 \approx 20$ отн. ед. Таким образом, экспериментальная оценка энергетической эффективности отражающего элемента составила $Ef \approx 63\%$. Понижение дифракционной эффективности вызвано в основном наличием расходящихся волн первого порядка дифракции, не участвующих в формировании Бесселева пучка [42], а также потерями из-за разницы интенсивности освещающего и формируемого пучка, из-за рассеяния на неоднородностях микрорельефа и технологических погрешностей. Отметим, что энергетическая эффективность кремниевое дифракционного элемента на пропускание ограничена сверху величиной в 50% из-за потерь на френелевское отражение (без учета других источников потерь, о которых говорилось выше).

На рис. 7 представлены экспериментальные результаты для элемента №2, изготовленного методом литья. Видно, что в области $L=20-50$ мм, где, согласно расчетам, должен формироваться Бесселев пучок, профиль распределения интенсивности заметно искажен. В дополнительных экспериментах с данным элементом было обнаружено, что искажение профиля связано с неплоскостью подложки элемента, возникшей вследствие малых остаточных деформаций олова, обладающего пластичностью. При работе на отражение такие деформации существенно искажают профиль формируемого пучка.

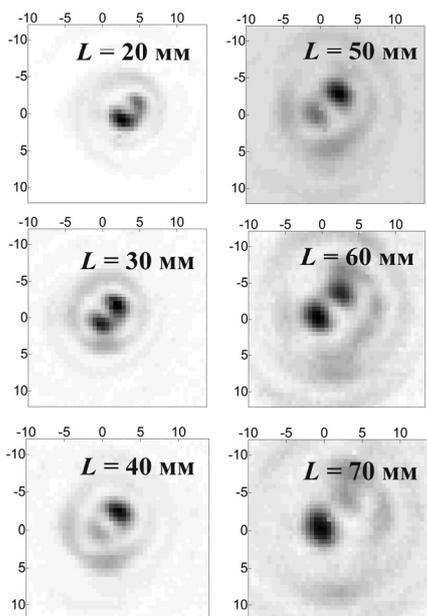


Рис. 7. Изображения поперечного сечения пучка, отраженного от ДОО №2, полученные на расстояниях $L=20-70$ мм. Область сканирования – 24×24 мм², шаг сканирования – 0,56 мм

Заключение

В работе предложен простой способ создания закрученных Бесселевых пучков субТГц-диапазона с орбитальным угловым моментом $l=1$ с помощью отражающих металлических дифракционных оптических элементов с непрерывным профилем микрорельефа. Микрорельеф отражающих элементов создавался 1) микрофрезерованием поверхности дюралевой полированной подложки или 2) литьем из олова. Созданные элементы были исследованы в субТГц-диапазоне в пучке излучения лампы обратной волны (длина волны $\lambda = 855$ мкм).

Для элемента, изготовленного микрофрезерованием, пучки формировались и сохраняли Бесселев профиль интенсивности на расстоянии от отражающего элемента 20–50 мм, что хорошо согласуется с результатами численного моделирования и теоретическими оценками. Экспериментально полученная оценка энергетической эффективности элемента составила 63%.

Для элемента, изготовленного методом литья из олова, формируемые пучки имели искажения профиля вследствие наличия остаточных деформаций олова, обладающего пластичностью. Для минимизации деформаций необходимо подбирать литейные материалы и термические режимы их обработки при изготовлении элемента.

Благодаря высокой отражающей способности металлических отражающих элементов они могут использоваться и при работе с источниками субТГц-излучения с высокой плотностью мощности, таких как лазеры на свободных электронах и гиротроны.

Благодарности

В работе использовалось оборудование Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения» на базе уникальной установки «Новосибирский ЛСЭ» в ИЯФ СО РАН. Авторы благодарят ЦКП ВТАН НГУ за проведение измерений на научном оборудовании. Расчет дифракционных оптических элементов выполнен при поддержке Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

References

- [1] Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory. *J Opt Soc Am A* 1987; 4(4): 651-654. DOI: 10.1364/JOSAA.4.000651.
- [2] Durnin J, Miceli JJ, Eberly JH. Diffraction-free beams. *Phys Rev Lett* 1987; 58(15): 1499-1501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.58.1499.
- [3] Khonina SN, Kazanskiy NL, Karpeev SV, Butt MA. Bessel beam: Significance and applications – a progressive review. *Micromachines* 2020; 11(11): 997. DOI: 10.3390/mi11110997.
- [4] Li SW, Aruga T. Long focal depth imaging over a long range. *J Commun Res Lab* 1996; 46: 309-310.
- [5] Krenn M, Fickler R, Fink M, Handsteiner J, Malik M, Scheidl T, Ursin R, Zeilinger A. Communication with

- spatially modulated light through turbulent air across Vienna. *New J Phys* 2014; 16(11): 113028. DOI: 10.1088/1367-2630/16/11/113028.
- [6] Li D, Imasaki K, Miyamoto S, Amano S, Mochizuki T. Conceptual design of Bessel beam cavity for free-electron laser. *Int J Infrared Milli Waves* 2006; 27: 165-171. DOI: 10.1007/s10762-006-9067-x.
- [7] O'Holleran K, Padgett MJ, Dennis MR. Topology of optical vortex lines formed by the interference of three, four, and five plane waves. *Opt Express* 2006; 14(7): 3039-3044. DOI: 10.1364/OE.14.003039.
- [8] Indebetouw G. Optical vortices and their propagation. *J Mod Opt* 1993; 40: 73-87. DOI: 10.1080/09500349314550101.
- [9] Pavelyev VS, Tukumakov KN, Reshetnikov AS, Gerasimov VV, Osintseva ND, Knyazev BA. Experimental investigation of the self-healing of terahertz Bessel beams with orbital angular momentum. *Computer Optics* 2021; 45(5): 673-677. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-845.
- [10] Mair A, Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons. *Nature* 2001; 412: 313-316. DOI: 10.1038/35085529.
- [11] Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist. *Nature Photon* 2011; 5: 343-348. DOI: 10.1038/nphoton.2011.81.
- [12] Fortin M, Pich M, Borra EF. Optical tests with Bessel beam interferometry. *Opt Express* 2004; 12(24): 5887-5895. DOI: 10.1364/OPEX.12.005887.
- [13] Baggio M, Tamminen A, Lamberg J, Grigorev R, Pälli S-V, Ala-Laurinaho J, Nefedova I, Bourges J-L, Deng SX, Brown ER, Wallace VP, Taylor ZD. Submillimeter-wave cornea phantom sensing over an extended depth of field with an axicon-generated Bessel beam. *IEEE Trans THz Sci Technol* 2023; 13: 132-144. DOI: 10.1109/TTHZ.2022.3221367.
- [14] Monk S, Arlt J, Robertson DA, Courtial J, Padgett MJ. The generation of Bessel beams at millimetre-wave frequencies by use of an axicon. *Opt Commun* 1999; 170: 213-215. DOI: 10.1016/S0030-4018(99)00463-0.
- [15] Ok G, Choi S-W, Park K, Chun H. Foreign object detection by sub-terahertz quasi-Bessel beam imaging. *Sensors* 2012; 13: 71-85. DOI: 10.3390/s130100071.
- [16] Nallappan K, Guerboukha H, Seghilani M, Ma T, Azana J, Nerguizian C, Skorobogatiy M. Multiplexing of terahertz wireless communication channels using vortex beams. *2017 42nd Int Conf on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* 2017; 1-1. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2017.8066888.
- [17] Knyazev BA, Serbo VG. Beams of photons with nonzero projections of orbital angular momenta: new results. *Phys-Usp* 2018; 61: 449-479. DOI: 10.3367/UFNe.2018.02.038306.
- [18] Salo J, Meltaus J, Nojonen E, Westerholm J, Salomaa MM, Lönnqvist A, Säily J, Häkli J, Ala-Laurinaho J, Räisänen AV. Millimetre-wave Bessel beams using computer holograms. *Electron Lett* 2001; 37(13): 834-835. DOI: 10.1049/el:20010551.
- [19] Meng H, Xiang B, Zhang J, Dou W, Yu Y. The generation of Bessel beam and its application in millimeter wave imaging. *J Infrared Milli Terahz Waves* 2014; 35: 208-217. DOI: 10.1007/s10762-013-0037-9.
- [20] Yu YZ, Dou WB. Nondiffracting millimeter waves beams generated by diffractive optical elements. *2008 38th European Microwave Conf* 2008: 951-954. DOI: 10.1109/EUMC.2008.4751612.
- [21] Yu YZ, Dou WB. Generation of Bessel beams at mm- and submm-wave bands using binary optical elements. *2008 Global Symposium on Millimeter Waves* 2008: 115-118. DOI: 10.1109/GSMM.2008.4534573.
- [22] Cheng L, Hong W, Hao Z-C. Generation of electromagnetic waves with arbitrary orbital angular momentum modes. *Sci Rep* 2014; 4: 4814. DOI: 10.1038/srep04814.
- [23] Gan Y, Meng H, Chen Y, Zhang X, Dou W. Generation of Bessel beams with 3D-printed lens. *Int J RF Microw Comput Aided Eng* 2020; 30(4): e22029. DOI: 10.1002/mmce.22029.
- [24] Wu G-B, Chan KF, Chan CH. 3-D printed terahertz lens to generate higher order Bessel beams carrying OAM. *IEEE Trans Antennas Propagat* 2021; 69(6): 3399-3408. DOI: 10.1109/TAP.2020.3030915.
- [25] Yu J-P, Chen S, Fan F, Cheng J-R, Xu S-T, Wang X-H, Chang S-J. Tunable terahertz wave-plate based on dual-frequency liquid crystal controlled by alternating electric field. *Opt Express* 2018; 26(2): 663-673. DOI: 10.1364/OE.26.000663.
- [26] Kuznetsov SA, Marcotegui JA, Lapanik VI. Electrically tunable quasioptical notch filter based on a liquid-crystal-metastructure for the short millimetre-wave range. *2021 46th Int Conf on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* 2021: 1-1. DOI: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567213.
- [27] Shen Z, Tang M, Chen P, Zhou S, Ge S, Duan W, Wei T, Liang X, Hu W, Lu Y-Q. Planar terahertz photonics mediated by liquid crystal polymers. *Adv Optical Mater* 2020; 8: 1902124. DOI: 10.1002/adom.201902124.
- [28] Shevchenko OA, Vinokurov NA, Arbuzov VS, et al. The Novosibirsk free-electron laser facility. *Bull Russ Acad Sci Phys* 2019; 83: 228-231. DOI: 10.3103/S1062873819020278.
- [29] Idehara T, Sabchevski SP, Glyavin M, Mitsudo S. The gyrotrons as promising radiation sources for THz sensing and imaging. *Appl Sci* 2020; 10: 980. DOI: 10.3390/app10030980.
- [30] Osintseva ND, Gerasimov VV, Knyazev BA, Komlenok MS, Pavelyev VS, Yablokov DE. Terahertz Bessel and "perfect" vortex beams generated with a binary axicon and axicon with continuous relief. *Computer Optics* 2022; 46(3): 375-380. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1066.
- [31] Pavelyev V, Khonina S, Degtyarev S, Tukumakov K, Reshetnikov A, Gerasimov V, Osintseva N, Knyazev B. Subwavelength diffractive optical elements for generation of terahertz coherent beams with pre-given polarization state. *Sensors* 2023; 23(3): 1579. DOI: 10.3390/s23031579.
- [32] Choporova YuYu, Knyazev BA, Kulipanov GN, Pavelyev VS, Scheglov MA, Vinokurov NA, Volodkin BO, Zhabin VN. High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range. *Phys Rev A* 2017; 96(2): 023846. DOI: 10.1103/PhysRevA.96.023846.
- [33] Kharitonov SI, Pavelyev VS, Kazanskiy NL, Strelkov YS, Tukumakov KN, Reshetnikov AS, Ganchevskaya SV, Gerasimov VV, Knyazev BA. Optimization, fabrication and characterization of a binary subwavelength cylindrical lens for the terahertz range. *Computer Optics* 2023; 47(1): 62-67. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1194.
- [34] Agafonov AN, Volodkin BO, Kaveev AK, Knyazev BA, Kropotov GI, Pavel'ev VS, Soifer VA, Tukumakov KN, Tsygankova EV, Choporova YuYu. Silicon diffractive optical elements for high-power monochromatic terahertz radiation. *Optoelectron Instrum Data Process* 2013; 49(2): 189-195. DOI: 10.3103/S875669901302012X.

- [35] Ordal MA, Long LL, Bell RJ, Bell SE, Bell RR, Alexander RW Jr, Ward CA. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared. *Appl Opt* 1983; 22(7): 1099-1120. DOI: 10.1364/AO.22.001099.
- [36] Agafonov AN, Knyazev BA, Pavel'ev VS, Akhmetova EI, Platonov VI. Elements of the terahertz power reflective optics with free-form surfaces. *Optoelectron Instrument Proc* 2019; 55: 148-153. DOI: 10.3103/S8756699019020067.
- [37] Safronov A, Safronov L. Rectangular electrical connectors. Some questions of the theory and technology of pressure casting of parts from non-ferrous metal alloys. *Technologies in the Electronic Industry* 2015; 4: 57-63.
- [38] Kozlov AM, Maluyutin GE. Improving the accuracy of conca VE shaped surfaces in finish milling on CNC machines [In Russian]. *News of TulGU. Engineering sciences* 2016; 8-2: 120-131.
- [39] Choporova Y, Knyazev B, Mitkov M, Osintseva N, Pavelyev V. Simulation of propagation and transformation of THz Bessel beams with orbital angular momentum. *Physics Procedia* 2016; 84: 175-183. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.031.
- [40] Knyazev BA, Choporova YuYu, Gerasimov VV, Kameshkov OE, Khasanov ISh, Krasnopevtsev SE, Nikitin AK, Osintseva ND, Pavelyev VS, Tukmakov KN, Reshetnikov AS. Techniques for generation of annular surface plasmon polaritons with refractive binary and reflective cylindrical diffraction gratings. *AIP Conf Proc* 2020; 2299(1): 030011. DOI: 10.1063/5.0030354.
- [41] Kozlov G, Volkov A. Coherent source submillimeter wave spectroscopy. In Book: Grüner G, ed. *Millimeter and submillimeter wave spectroscopy of solids*. Vol 74. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 1998: 51-109. DOI: 10.1007/BFb0103420.
- [42] Osintseva ND, Volodkin BO, Knyazev BA, Pavelyev VS, Choporova YuYu. Features of rotating Bessel beams formed using binary axicons [In Russian]. Collection of proceedings of the III international conference and youth school "Information technologies and nanotechnologies" (ITNT-2017). Samara: "Novaya Tehnika" Publisher; 2017: 294-300.

Сведения об авторах

Герасимов Василий Валерьевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г.И. Будкера, зав. научно-исследовательской лаборатории прикладной электродинамики Новосибирского государственного университета. Область научных интересов: оптика и фотоника, терагерцевое и инфракрасное излучение, плазмоника, метаматериалы, спектроскопия, биомедицинские приложения. E-mail: y.gerasimov@nsu.ru

Осинцева Наталья Дмитриевна, младший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Научные интересы: терагерцевое излучение, лазеры на свободных электронах, дифракционные оптические элементы, пучки с орбитальным угловым моментом. E-mail: natalyaosintseva@gmail.com

Павельев Владимир Сергеевич, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой наноинженерии Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва; главный научный сотрудник Института систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт». Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, нанофотоника и синтез оптических метаматериалов, технологии формирования микро- и наноструктур. E-mail: nano@ssau.ru

Агафонов Андрей Николаевич, к.т.н., доцент кафедры наноинженерии, научный сотрудник НОЦ нанотехнологий Самарского государственного аэрокосмического университета имени С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: микро и нанотехнологии, МЭМС. E-mail: agafonov.ssau@yandex.ru

ГРНТИ: 29.31.15, 29.31.29

Поступила в редакцию 14 августа 2023 г. Окончательный вариант – 2 ноября 2023 г.

Generation of Bessel vortex beams in the subterahertz range using reflecting diffractive optical elements

V.V. Gerasimov^{1,2}, N.D. Osintseva², V.S. Pavelyev^{3,4}, A.N. Agafonov³

¹ Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova St. 1;

² Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Lavrentyeva Ave. 11;

³ Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34;

⁴ Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute",
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151

Abstract

In this work, we propose a simple method for generating Bessel vortex beams in the subterahertz (subTHz) range with the orbital angular momentum with $l = 1$ based on reflecting metal diffractive optical elements with a continuous helical microrelief. The elements are fabricated by micromilling in a polished duralumin substrate and by tin casting, and tested using a backward wave oscillator (wavelength $\lambda = 855 \mu\text{m}$). When using the micromilled element, Bessel vortex beams are shown to be generated and retain a Bessel intensity profile at a distance of 20 – 50 mm from the reflecting element, which is in good agreement with the results of numerical simulation. An experimental estimate of the energy efficiency of this element is 63%. When using elements made by tin casting, the vortex beams are generated with a distorted profile due to the presence of residual deformations of tin, which has plasticity. Due to their high conductivity, metallic reflecting elements can be used with high power density sub-THz radiation sources such as free electron lasers and gyrotrons.

Keywords: diffractive optics, subterahertz range, Bessel beam, vortex beam, reflecting diffractive optical element.

Citation: Gerasimov VV, Osintseva ND, Pavelyev VS, Agafonov AN. Generation of Bessel vortex beams in the subterahertz range using reflecting diffractive optical elements. *Computer Optics* 2024; 48(3): 334-341. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1410.

Acknowledgements: The work was done at the shared-use center "Siberian Synchrotron and Terahertz Center" and utilized the Novosibirsk free electron laser at the Budker institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the RAS. The authors acknowledge core facilities "VTAN" (Novosibirsk State University) for access to the experimental equipment. The design of the diffractive optical elements was funded by a government project of the NRC "Kurchatov Institute".

Authors' information

Vasily Valerievich Gerasimov, PhD in Physics and Mathematics; head of the Research Laboratory of Applied Electrodynamics of the Novosibirsk State University, senior researcher of the Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS. Research interests: optics and photonics, terahertz and infrared radiation, plasmonics, metamaterials, spectroscopy, biomedical applications. <https://orcid.org/0000-0003-1282-6005>. E-mail: v.gerasimov@nsu.ru

Natalya Dmitrievna Osintseva, junior researcher of the Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS. Research interests: terahertz radiation, free electron lasers, diffractive optical elements, beams with orbital angular momentum. <https://orcid.org/0000-0002-0750-4135>. E-mail: natalyaosintseva@gmail.com

Vladimir Sergeevich Pavelyev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Head of Nanoengineering department of the Samara University, principal researcher of the Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute". Research interests: diffractive microoptics, optical waveguides, nanophotonics, optical metamaterials synthesis, technologies for forming of micro- and nanostructures. <https://orcid.org/0000-0003-2803-2138>. E-mail: nano@ssau.ru

Andrey Nikolaevich Agafonov, PhD in Technical Sciences; assistant of Nanoengineering department, researcher of REC "Nanotechnology" of Samara State Aerospace University named after S. P. Korolyov (National Research University). Research interests: Micro and nanotechnology, MEMS. E-mail: agafonov.ssau@yandex.ru

Received August 14, 2023. The final version – November 2, 2023.
