

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra23.04.302>

УДК 535.14, 537.862

PACS number: 42.60.By

М. И. ДЗЮБЕНКО<sup>1,3</sup>, В. А. МАСЛОВ<sup>2</sup>, Е. Н. ОДАРЕНКО<sup>3,2</sup>,  
В. П. РАДИОНОВ<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина  
E-mail: mid41@ukr.net, radion@ire.kharkov.ua<sup>2</sup> Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина  
E-mail: v.a.maslov@karazin.ua<sup>3</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники,  
пр-т. Науки, 14, г. Харьков, 61166, Украина  
E-mail: e.n.odarenko@gmail.com

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ РЕШЕТОК В ЛАЗЕРАХ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА

*Предмет и цель работы: Для дальнейшего освоения терагерцевого диапазона частот требуется развитие и совершенствование источников излучения, способных работать в этом диапазоне. Одними из немногочисленных источников терагерцевого излучения являются субмиллиметровые лазеры. В качестве выходных зеркал таких лазеров широко используются металлические периодические структуры. Преимуществом периодической структуры является то, что путем подбора ее параметров можно обеспечить оптимальный коэффициент пропускания выходного зеркала и требуемую поляризацию лазерного излучения. Для снижения дифракционных потерь и уменьшения расходимости выходного лазерного пучка часто требуется применять вогнутые зеркала в лазерном резонаторе. Однако такие зеркала значительно дороже и сложнее в изготовлении, чем плоские. Особенно сложно выполнить периодическую структуру с неплоской подложкой. Целью работы является исследование плоских градиентных металлических решеток, обладающих свойствами сферических зеркал и линз одновременно.*

*Методы и методология: Для решения проблемы фокусировки предложены плоские градиентные металлические решетки в виде концентрических колец с изменяющимися параметрами в радиальном направлении. В работе представлена методика моделирования фазовых характеристик таких кольцевых градиентных решеток. Проведено моделирование свойств кольцевой решетки, у которой расстояние между кольцами уменьшается в направлении от центра к краям.*

*Результаты: В результате численного моделирования получена картина изменения фазового фронта волны, которая возникает при взаимодействии электромагнитного поля с градиентной решеткой. Рассмотренная решетка имеет свойства вогнутого зеркала и фокусирующей линзы одновременно. Такое сочетание свойств градиентных решеток, в случае использования их в качестве выходных зеркал резонатора, позволяет улучшить энергетические и пространственно-угловые характеристики выходного излучения терагерцевых лазеров.*

*Заключение: Использование кольцевых градиентных решеток в качестве выходных зеркал терагерцевых лазеров дает возможность снизить дифракционные потери и уменьшить расходимость лазерного пучка, что позволяет повысить эффективность терагерцевых лазеров.*

*Ключевые слова: терагерцевый диапазон, лазер, выходное зеркало резонатора, градиентные решетки*

### 1. Введение

Терагерцевый диапазон (0.1÷10 ТГц) в настоящее время активно осваивается в различных областях науки, техники и медицины. В качестве источников излучения в этом диапазоне используются субмиллиметровые лазеры, имеющие длину волны от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров. Это, в частности, газоразряд-

ные лазеры и лазеры с оптической накачкой [1, 2]. Субмиллиметровые лазеры имеют ряд специфических особенностей, обусловленных соотношением размеров резонатора с длиной волны излучения. Обычно поперечное сечение резонатора этих лазеров превышает длину волны примерно на два порядка. При таких сечениях лазерных пучков ярко проявляются волновые свойства излучения. Поэтому при их анализе целесообразно использовать принципы и методы квазиоптики. В субмиллиметровых лазерах применяются резонаторы волноводного типа. Для вывода излу-

© М. И. Дзюбенко, В. А. Маслов, Е. Н. Одаренко,  
В. П. Радионов, 2018

ния используются частично прозрачные выходные зеркала в виде периодических структур с периодом меньше длины волны. Они образованы металлическими проводниками различных конфигураций. Важными достоинствами периодических структур являются широкий диапазон варьирования коэффициента пропускания и возможность влиять на поляризационные и энергетические параметры лазерного излучения. Благодаря этим качествам периодические структуры стали наиболее предпочтительными для использования в качестве выходных зеркал лазеров терагерцевого диапазона.

Наиболее полно теоретически исследованы и чаще других применяются на практике периодические структуры, образованные параллельными проводниками [3, 4]. Такие одномерные периодические структуры позволяют получать линейно поляризованное лазерное излучение с направлением вектора поляризации электрического поля, параллельным проводникам решетки (*E*-поляризация). Линейно поляризованное излучение используется в различных измерительных устройствах, в частности в эллипсометрах. Конструкции решеток разнообразны. Наиболее технологичной является металлическая решетка, выполненная на прозрачной диэлектрической подложке. На подложке можно выполнять структуры разнообразных конфигураций, например, в виде пересекающихся проводников или отдельных фрагментов [5, 6]. Разнообразие периодических структур влечет за собой расширение возможностей формирования требуемых параметров лазерного излучения. Особый интерес представляют периодические структуры в виде концентрических колец и радиальных полос [7], которые позволяют получать лазерное излучение с радиальной и азимутальной поляризациями. Такое излучение хорошо фокусируется, что полезно для лазерной сварки и перфорации материалов.

Важной особенностью периодических структур является то, что они вносят фазовый сдвиг в отраженное и прошедшее сквозь них электромагнитное излучение. Величина фазового сдвига зависит от параметров периодической структуры – геометрических размеров проводников и расстояний между ними. Если параметры периодической структуры неодинаковы вдоль ее поверхности, то это приводит к изменению фазово-

го фронта электромагнитного излучения, взаимодействующего с ней. Поэтому периодическая структура, выполненная на плоской поверхности, может приобретать свойства искривленных зеркал и линз. Эти свойства проявляются в разнообразных градиентных решетках [8–17], которые относятся к категории метаматериалов. Такие свойства могут быть полезны при использовании градиентных решеток в качестве выходных зеркал лазеров. Ведь в лазерах часто применяются сферические зеркала для достижения требуемой каустики резонатора и снижения дифракционных потерь излучения. В резонаторах лазеров терагерцевого диапазона для снижения дифракционных потерь используются сферические зеркала с большим радиусом кривизны (6 ÷ 8 м при длине резонатора 1 м). Такие зеркала позволяют снизить потери не только в классических открытых резонаторах, но и в резонаторах волноводного типа, поскольку уменьшают негативное влияние неоднородностей волновода и зазоров между волноводом и зеркалами [18]. Однако сферические зеркала большого радиуса кривизны значительно сложнее в изготовлении, чем плоские зеркала. Поэтому создание плоских частично прозрачных зеркал, способных искривлять фазовый фронт электромагнитных волн, что присуще сферическим зеркалам и линзам, является весьма актуальной задачей.

Цель работы – исследование взаимодействия плоских градиентных металлических решеток с азимутально поляризованным электромагнитным излучением терагерцевого диапазона.

## 2. Методы исследования

Ранее [19, 20] нами была предложена градиентная решетка (см. рис. 1.), состоящая из концентрических металлических колец 1, размещенных на плоской прозрачной пластине 2. Период такой решетки изменяется в радиальном направлении с определенным шагом. Это приводит к изменению кривизны фазового фронта отраженных и прошедших сквозь решетку электромагнитных волн. В зависимости от того, как изменяются параметры решетки в радиальном направлении, она может приобретать различные свойства, в том числе свойства вогнутых или выпуклых зеркал и одновременно фокусирующих или рассеивающих линз.

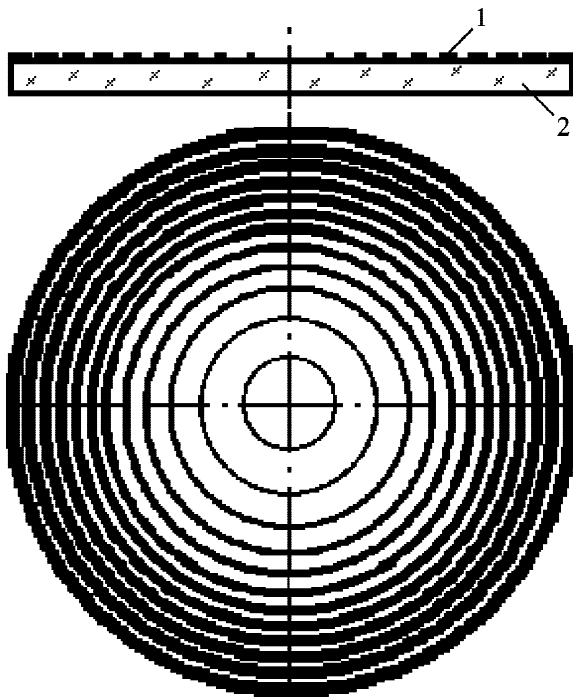


Рис. 1. Градиентная металлическая решетка, состоящая из concentрических металлических колец

Для создания и применения таких градиентных решеток необходимо было разработать методику моделирования изменений, вносимых этими решетками в плоские фазовые фронты электромагнитных волн. При этом целесообразно использовать уже имеющиеся и апробированные методики расчета параметров дифракционных решеток, образованных параллельными проводниками, которые приведены во многих фундаментальных работах, в частности в работе [4]. Поскольку кольцевая решетка имеет осевую симметрию, максимальную информативность несет изменение фазового фронта отраженных и прошедших волн в ее диаметральной сечении. Для расчета этих параметров нами было предложено рассматривать кольцевую решетку (рис. 2, а) как состоящую из отдельных секторов, в которых проводники параллельны [21, 22]. При этом используются два диаметрально противоположных сектора (рис. 2, б). Условно считается, что длина проводников не ограничена (рис. 2, в). В этом случае может использоваться классическая методика расчета коэффициентов отражения, пропускания и фазового сдвига для решеток, состоящих из параллельных проводников.

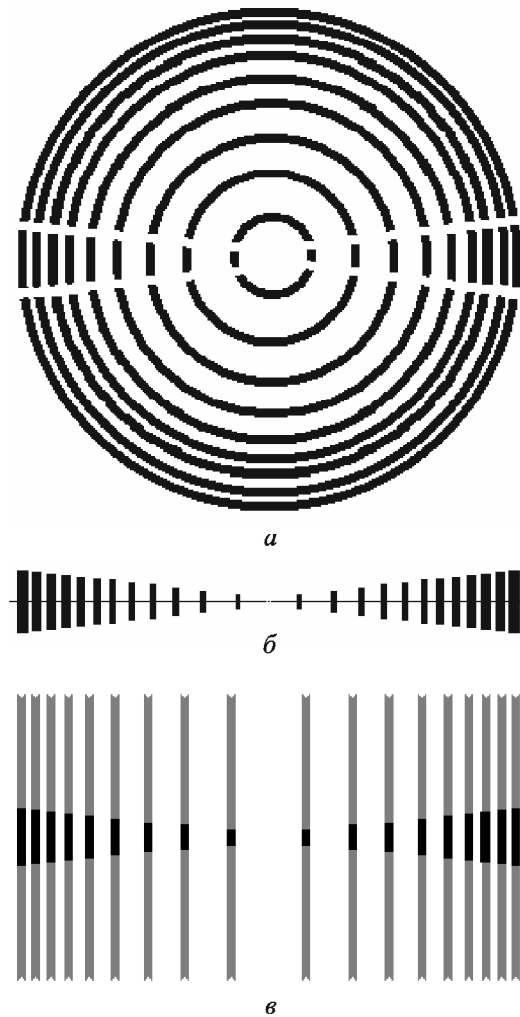


Рис. 2. Модель для расчета (в), построенная на базе двух диаметрально противоположных секторов (б) кольцевой решетки (а)

В кольцевых градиентных решетках может изменяться как расстояние между проводниками, так и их ширина либо и то и другое. Изменение каждого из этих двух параметров в разной мере влияет на прозрачность решетки и на вносимый ею фазовый сдвиг [4]. Изменение расстояния между проводниками приводит к ярко выраженному изменению фазового сдвига. Поэтому для повышения иллюстративности изменения фазовых фронтов без существенного усложнения расчетов в работе рассмотрен случай, когда изменяется только расстояние между проводниками решетки при неизменной ширине колец. Период решетки уменьшается в направлении от центра к краям. При таком изменении периода решетки обладают свойствами волну-

тых зеркал, что наиболее востребовано в лазерных резонаторах.

Для определения формы фазового фронта волны, отраженной от градиентной решетки, было проведено численное моделирование с использованием метода FDTD (Finite-difference time-domain) [23], который представлен в свободно доступном пакете программ МЕЕР [24]. Такой метод обладает высокой иллюстративностью и достаточной точностью.

На рис. 3 представлены схема двумерной области расчета и соответствующая система координат. Система является бесконечной в направлении оси  $Oz$  (перпендикулярно плоскости рисунка). Для исключения влияния отражений от границ расчетной области используются поглощающие граничные условия (PML). Горизонтальная стрелка показывает направление волнового вектора. Градиентная решетка расположена на поверхности кварцевой подложки. В положительном направлении оси  $Ox$  на структуру падает плоская монохроматическая волна  $E_z$  поляризации с длиной волны  $\lambda = 337$  мкм (длина волны излучения газоразрядного HCN-лазера). Для обеспечения плоского фазового фронта падающей волны размер источника излучения вдоль оси  $Oy$  выбран несколько большим, чем размер структуры.

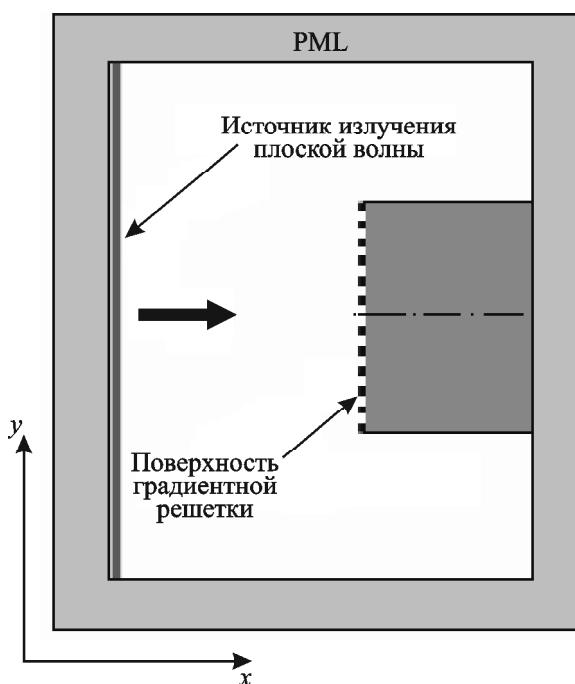


Рис. 3. Схема области расчета модели градиентной решетки

### 3. Результаты исследования и их обсуждение

Моделирование проводилось для кольцевых решеток диаметром 4 мм. Это примерно в десять раз меньше диаметра реальных зеркал, используемых в HCN-лазерах. При таком малом диаметре зеркала удается получить наглядную картину искривления фазового фронта. Рассматривалась решетка, которая имеет осевую симметрию и состоит из металлических лент толщиной 0.5 мкм и шириной 20 мкм. Последовательность изменения периода решетки показана на рис. 4. Расстояние от центральной оси до ближайших лент составляет 160 мкм. Расстояние между лентами уменьшается при удалении от центра решетки. Шаг уменьшения периода составляет 8 мкм. Размер решетки вдоль оси  $Oy$  равен 4 мм. Решетка имеет 42 ленты (по 21 ленте по обе стороны от центра).

В процессе численных расчетов определялись фаза и модуль электрической напряженности поля (компонента  $E_z$ ) в каждой точке области моделирования. После отражения плоской волны от поверхности градиентной решетки полное поле в расчетной области представляет собой суперпозицию падающего и отраженного полей. Следовательно, сравнивая пространственное распределение фазы электрического поля, отраженного от градиентной решетки, с фазой плоской волны, можно судить об изменении фазового фронта волны.

На рис. 5, а представлены результаты расчета поля, рассеянного рассматриваемой градиентной решеткой. Вертикальной стрелкой указано расположение градиентной решетки. Для сравнения здесь приведено пространственное распределение поля, отраженного от вогнутого металличе-

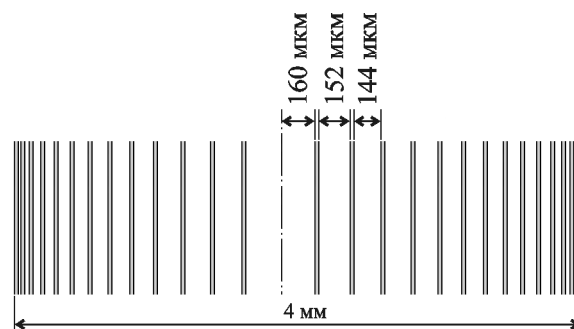


Рис. 4. Последовательность изменения периода градиентной решетки в радиальном направлении

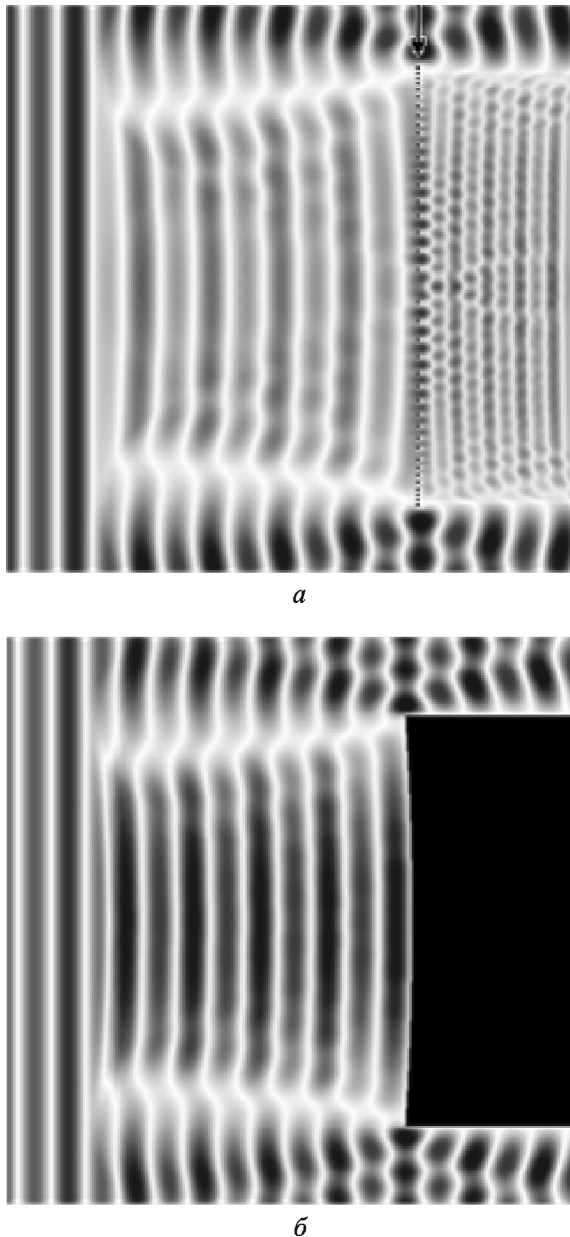


Рис 5. Пространственное распределение электрического поля при падении плоских волн на градиентную металлическую решетку (а) и вогнутое металлическое зеркало (б)

кого зеркала с радиусом кривизны  $R = 60$  мм (рис. 5, б). Как видно из рис. 5, наблюдается хорошее качественное соответствие распределений поля для структуры с градиентной решеткой и для металлического зеркала. Темные области отображают противоположные фазы поля, а светлые – нулевую амплитуду поля. Изображения, представленные на рис. 5, соответствуют моменту времени, когда отраженная от структуры волна еще не достигла левой границы расчетной

области. Поэтому вблизи этой границы видно пространственное распределение поля плоской волны, излучаемой источником.

На рис. 6 представлены результаты расчета фазы поля при фиксированных значениях времени и координаты  $x$  (рис. 3). Расчетный момент времени выбирался таким же, как и для построения изображения на рис. 5 (от рассматриваемой структуры отразились несколько волн). Координата  $x$  (рис. 3) выбиралась в области существования падающей и отраженной волн. На рис. 6 по оси  $y$  отражены узлы расчетной сетки. Сплошная кривая 1 соответствует фазовому профилю поля, отраженного от градиентной структуры. Штриховая 2 и пунктирная 3 кривые демонстрируют фазовый профиль полей, отраженных от металлических зеркал с радиусами кривизны  $R = 30$  мм и  $R = 60$  мм соответственно. Вертикальные штрихпунктирные линии обозначают границы рассеивающей структуры (зеркала или градиентной решетки).

Видно, что изменение радиуса кривизны металлического зеркала приводит к существенным количественным изменениям пространственного распределения фазы поля. Вместе с тем качественно его вид практически не изменяется. Естественно, что уменьшение радиуса кривизны зеркала приводит к более существенному искривлению фазового фронта отраженной волны. Результаты расчета для градиентной решетки хорошо совпадают с результатами, полученными

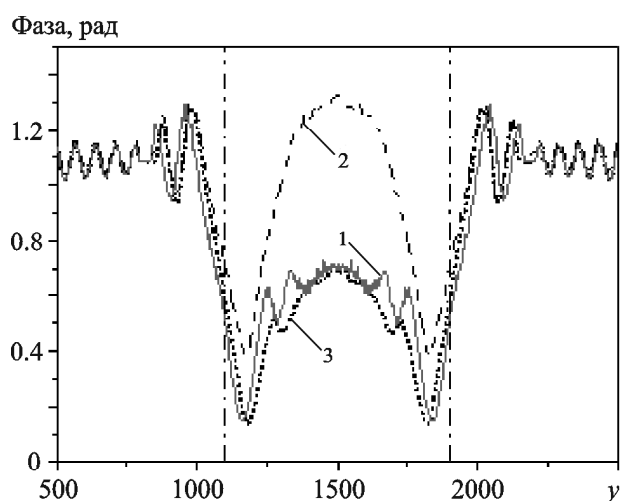
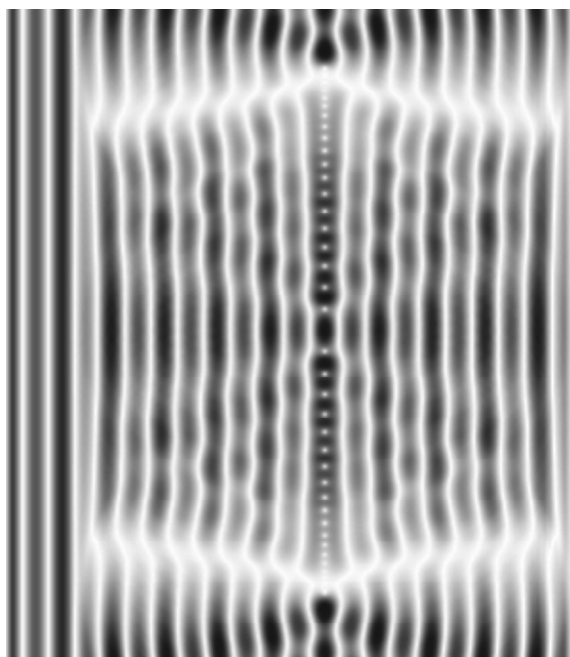


Рис. 6. Фазовый профиль поля отраженных волн при взаимодействии излучения с исследуемой градиентной решеткой (кривая 1) и с вогнутыми металлическими зеркалами с радиусами кривизны 30 мм (кривая 2), 60 мм (кривая 3)

для металлического зеркала с радиусом кривизны  $R = 60$  мм.

Поскольку часть электромагнитной энергии проходит через решетку, интенсивность отраженного поля в этом случае оказывается меньше, чем для полностью отражающего металлического зеркала. Кроме того, наблюдается запаздывание фазового фронта в области центральной оси. Такое искривление фазового фронта соответствует искривлению, вносимому фокусирующей линзой. Следовательно, исследуемая градиентная решетка одновременно имеет свойства вогнутого частично прозрачного зеркала для отраженной волны и фокусирующей линзы для прошедшей волны. Для сравнения искривления фазовых фронтов отраженных от решетки и прошедших сквозь нее волн проведено моделирование пространственного распределения поля для решетки без подложки (рис. 7). Искривление волновых фронтов отраженных и прошедших волн практически идентично. Такое сочетание свойств вогнутого зеркала и фокусирующей линзы может быть полезно при использовании градиентной решетки в качестве выходного зеркала лазерного резонатора. Такое зеркало будет способствовать снижению дифракционных потерь в резонаторе и



**Рис. 7.** Пространственное распределение электрического поля при падении плоских волн на градиентную металлическую решетку, находящуюся в свободном пространстве

уменьшать дифракционную расходимость выходного пучка лазерного излучения. Очевидно, что при обратном изменении периода решетки (более густая в центре) она приобретет функции выпуклого зеркала и рассеивающей линзы.

Изменение геометрических размеров решетки и ее периодичности приведет к изменению радиуса кривизны ее эквивалентной отражающей поверхности. Причем увеличивать радиус кривизны эквивалентной отражающей поверхности можно без ограничений – до состояния плоского зеркала. Для этого нужно уменьшать изменение расстояний между кольцами в радиальном направлении. Предельным состоянием является кольцевая решетка с одинаковыми расстояниями между кольцами. На пути уменьшения радиуса кривизны эквивалентной отражающей поверхности существуют ограничения. Посредством изменения расстояния между кольцами максимальный фазовый сдвиг может быть получен в пределах от величины сдвига, вносимого сплошной металлической поверхностью, до отсутствия сдвига (в свободном пространстве). При одинаковой разнице фазовых сдвигов на краях и в центре кольцевой решетки большее искривление фазового фронта можно получить при меньшем наружном диаметре решетки. Таким образом, минимальные радиусы кривизны эквивалентной отражающей поверхности, обеспечивающие высокую фокусирующую способность кольцевой градиентной решетки, можно получить при малом ее диаметре. При увеличении наружного диаметра градиентной кольцевой решетки ее фокусирующие способности снижаются. В реальных терагерцевых лазерах для снижения дифракционных потерь вполне достаточно достижимой фокусировки. Тем более что при увеличении дифракционной расходимости, вызванной уменьшением апертуры пучка, одновременно увеличиваются фокусирующие возможности градиентных решеток вследствие уменьшения их диаметра.

Однако если понадобится расширить границы фокусировки, можно использовать принцип, лежащий в основе линз Френеля. Для этого можно выполнить кольцевую градиентную решетку секционированной – так, чтобы плавное изменение ее периода происходило в пределах повторяющихся концентрических групп колец. На рис. 8 показан пример такой решетки, состоящей из двух групп колец.

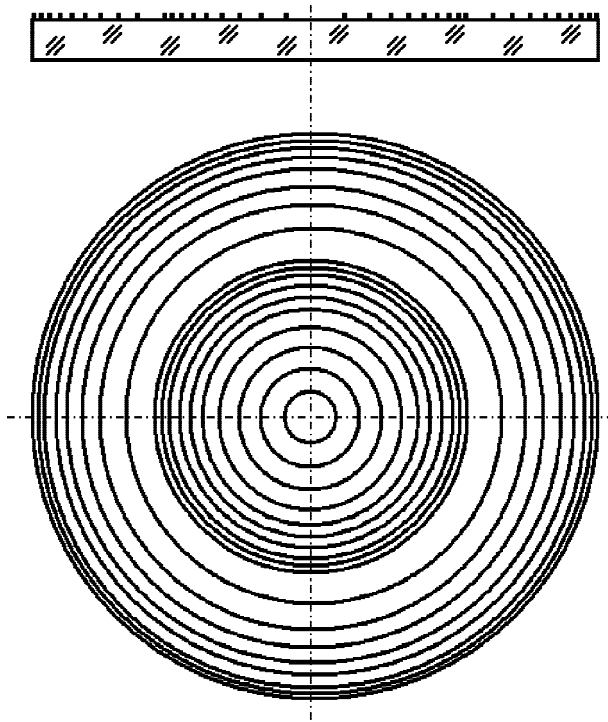


Рис. 8. Секционированная градиентная решетка

Моделирование фазовых фронтов для секционированных градиентных решеток производится аналогичным образом. На рис. 9 приведена последовательность изменения периода секционированной кольцевой градиентной решетки, состоящей из двух групп колец.

На рис. 10 представлены результаты моделирования пространственного распределения поля, рассеянного градиентной решеткой, состоящей из двух групп колец.

При взаимодействии излучения с секционированной кольцевой градиентной решеткой удается получить большее искривление волнового фронта, особенно в центральной части решетки. Однако при этом наблюдаются фазовые неоднородности волновых фронтов на стыке кольцевых групп и требуются дополнительные меры по их согласованию. Осуществление секционирования кольцевых градиентных решеток расширяет возможности формирования разнообразных конфигураций пучка электромагнитного излучения.

#### 4. Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что плоские круговые градиентные решетки, коэффициент заполнения которых увеличивается в направлении от центра к краям, одновременно выполняют функции вогнутых зеркал и фокусирующих линз. Сочетание таких свойств открывает перспективы для использования этих решеток в качестве выходных зеркал терагерцевых лазеров. Такие зеркала позволяют генерировать лазерное излучение с азимутальной поляризацией и обеспечивать требуемую каустическую резонатора. Это в свою очередь приводит к снижению дифракционных потерь в резонаторе и компенсации дифракционной расходимости выходного пучка лазерного излучения. Задавая различную последовательность изменения периодичности кольцевой решетки, можно получать большое разнообразие форм эквивалентных отражающих поверхностей и фокусирующих (рассеивающих) линз. Диапазон варьирования сочетаний

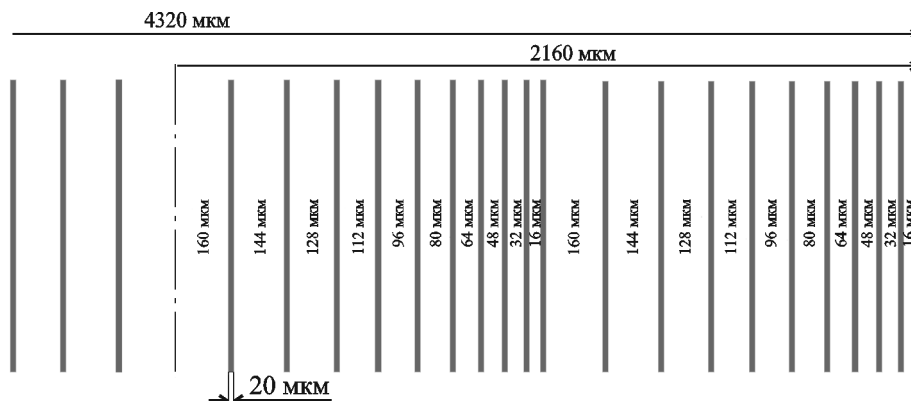
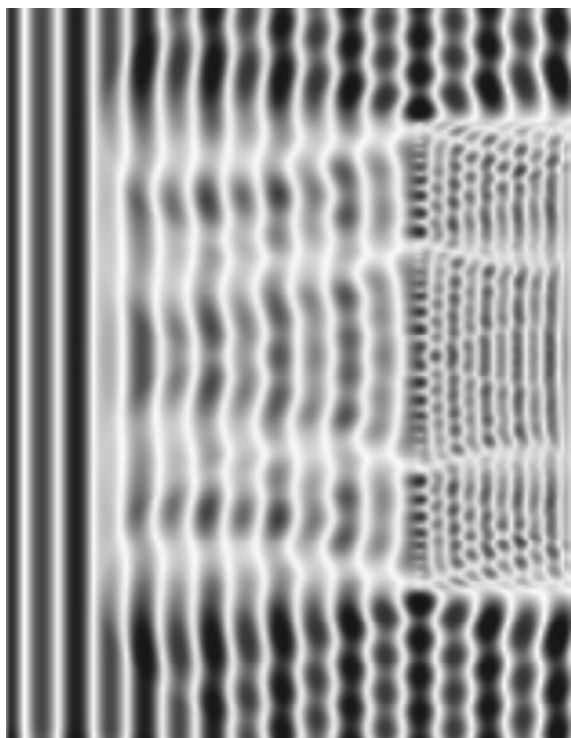


Рис. 9. Последовательность изменения периода секционированной кольцевой градиентной решетки, состоящей из двух групп колец



**Рис. 10.** Пространственное распределение поля, рассеянно-го секционированной кольцевой градиентной решеткой, состоящей из двух групп колец

фокусирующих (рассеивающих) свойств градиентных решеток и коэффициентов их отражения (пропускания) может быть расширен путем секционирования градиентных решеток и изменения как расстояния между проводниками, так и их ширины.

Область применения рассмотренных градиентных решеток, как и прочих периодических структур, не ограничивается терагерцевым диапазоном. Тенденция миниатюризации лазерной техники и совершенствование технологии изготовления периодических структур открывают широкие возможности применения квазиоптических принципов и в лазерах других диапазонов. Градиентные периодические структуры могут найти применение не только в лазерах, а и в различных областях науки и техники. В частности, плоские кольцевые периодические структуры, имеющие свойства неплоской отражающей поверхности, могут использоваться в качестве рефлекторов антенн. Такие компактные рефлекторы могут применяться в различных мобильных носителях, в том числе и в космосе, например в радиотелескопах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дзюбенко М. И., Каменев Ю. Е., Радионов В. П. Газоразрядные лазеры терагерцевого диапазона. *Радиофизика и электроника*. 2017. Т. 22. № 3. С. 58–80. DOI: 10.15407/rej2017.03.058
2. Дегтярев А. В., Маслов В. А., Топков А. Н. Глава 11. Лазеры терагерцевого диапазона с оптической накачкой. *Генерация и усиление сигналов терагерцевого диапазона: коллективная монография*. Под ред. А. Е. Храмова, А. Г. Баланова, В. Д. Еремки, В. Е. Запевалова, А. А. Короновского. Саратов, Россия: Саратовский гос. техн. ун-т, 2016. С. 404–459.
3. Вайнштейн Л. А. К электродинамической теории решеток. Ч. 1. Идеальная решетка в свободном пространстве. *Электроника больших мощностей*. Москва: Изд-во АН СССР, 1963. Т. 2. С. 26–56.
4. Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. *Резонансное рассеяние волн. Дифракционные решетки. Т. 1*. Киев: Наукова думка, 1986. 227 с.
5. Baron T., Euphrasie S., Mbarek S. B., Vairac P., and Cretin B. Design of metallic mesh absorbers for high bandwidth electromagnetic waves. *Prog. Electromagn. Res. C*. Vol. 8, pp. 135–147. DOI: 10.2528/PIERC09052204
6. Weitz D. A., Skocpol W. J., and Tinkham M. Capacitive-mesh output couplers for optically pumped far-infrared lasers. *Opt. Lett.* 1978. Vol. 3, Is. 1. P. 13–15. DOI: 10.1364/OL.3.000013
7. Gurin O. V., Degtyarev A. V., Legenkyi M. N., Maslov V. A., Svich V. A., Senyuta V. S., and Topkov A. N. Generation of transverse modes with azimuthal polarization in a terahertz band waveguide laser. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2014, Vol. 73, Is. 20. P. 1819–1830. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i20.30
8. Шматько А. А. *Электронно-волновые системы миллиметрового диапазона. Том 1*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. 464 с.
9. Егоров М. Б., Шматько А. А. Рассеяние поля линейного распределенного источника на нерегулярной решетке в волноводе с произвольным законом изменения ее параметров. *Доклады АН УССР. Сер. А*. 1987. № 6. С. 42–45.
10. Gan Q., Fu Z., Ding Y. J., and Bartoli F. J. Ultrawide-bandwidth slow-light system based on THz plasmonic graded metallic grating structures. *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 100, Is. 25. id. 256803. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.256803
11. Xu Y., Fu Y., and Chen H. Steering light by a sub-wavelength metallic grating from transformation optics. *Sci. Rep.* 2015. Vol. 5, id. 12219. DOI: 10.1038/srep12219
12. Verslegers L., Catrysse P. B., Yu Z., White J. S., Barnard E. S., Brongersma M. L., and Fan S. Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film. *Nano Lett.* 2009. Vol. 9, Is. 1. P. 235–238. DOI: 10.1021/nl802830y
13. Xu Y., Fu Y., and Chen H. Planar gradient metamaterials. *Nat. Rev. Mat.* 2016. Vol. 1, id. 16067. DOI: 10.1038/natrevmats.2016.67
14. Feng D. and Zhang C. Optical focusing by planar lenses based on nano-scale metallic slits in visible regime. *Phys. Procedia*. 2011. Vol. 22. P. 428–434. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.11.067



15. Lin H. and Huang C.-S. Linear variable filter based on a gradient grating period guided-mode resonance filter. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2016. Vol. 28, Is. 9. P. 1042–1045. DOI: 10.1109/LPT.2016.2524655
16. Shi H., Wang C., Du C., Luo X., Dong X., and Gao H. Beam manipulating by metallic nano-slits with variant widths. *Opt. Exp.* 2005. Vol. 13, Is. 18. P. 6815–6820. DOI: 10.1364/OPEX.13.006815
17. Chen M., Fan F., Xu S.-T., and Chang S.-J. Artificial high birefringence in all-dielectric gradient grating for broadband terahertz waves. *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6, id. 38562. DOI: 10.1038/srep38562
18. Gurin O. V., Degtyarev A. V., Maslov V. A., Ryabykh V. N., and Topkov A. V. Terahertz laser waveguide resonators with internal spherical mirrors. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2016. Vol. 75, No. 18. P. 1665–1677. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i18.60
19. Dzyubenko M. I., Maslov V. A., and Radionov V. P. Applying of the flat circular metal gratings as spherical output mirrors of terahertz lasers. *Proceedings of the 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*. (20–24 June, 2016. Kharkiv). Kharkiv, Ukraine, 2016. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538117
20. Патент України №115126 від 10.04.2017 на корисну модель. Дзюбенко М. І., Маслов В. О., Радіонов В. П. Азимутальне вихідне дзеркало лазерного резонатора. Бюл. № 7, 2017.
21. Dzyubenko M. I., Radionov V. P., Maslov V. A., and Odarenko E. N. Plane circular gradient grating that combines the functions of a spherical mirror and a focusing lens. *Proceedings of the IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS)*. (29–31 August, 2017. Kiev). Kiev, Ukraine, 2017. P. 139–142. DOI: 0.1109/MRRS.2017.8075047
22. Dzyubenko M. I., Maslov V. A., Odarenko E. N., and Radionov V. P. Planar Gradient Metamaterial with the Properties of Spherical Partially Transparent Terahertz Mirror. *Proceedings of the Second International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017)*. (September 11–15, 2017. Odesa). Odesa, Ukraine, 2017. P. 189–192.
23. Taflove A. and Hagness S. C. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. Norwood, MA, USA: Artech House, Ink., 2000.
24. Oskooi A. F., Roundy D., Ibanescu M., Bermel P., Joannopoulos J. D., and Johnson S. G. MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method. *Comput. Phys. Commun.* 2010. Vol. 181, Is. 3. P. 687–702. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.11.008
25. *signals: collective monograph*. Saratov, Russia: Saratov State Technical University Publ. pp. 404–459. (in Russian).
3. VAYNSHTEYN, L. A., 1963. To the electrodynamic theory of gratings. Part 1. The ideal grating in free space. In: *High Power Electronics*. Moscow, Russia: AS USSR Publ. vol. 2, pp. 26–56. (in Russian).
4. SHESTOPALOV, V. P., KIRILENKO, A. A., MASALOV, S. A. and SIRENKO, YU. K., 1986. *Resonance scattering of waves. Diffraction gratings*. Vol. 1. Kiev, Ukraine: Naukova dumka Publ. (in Russian).
5. BARON, T., EUPHRASIE, S., MBAREK, S. B., VAIRAC, P. and CRETIN, B., 2009. Design of metallic mesh absorbers for high bandwidth electromagnetic waves. *Prog. Electromagn. Res. C*. vol. 8, pp. 135–147. DOI: 10.2528/PIERC09052204
6. WEITZ, D. A., SKOCPOL, W. J. and TINKHAM, M., 1978. Capacitive-mesh output couplers for optically pumped far-infrared lasers. *Opt. Lett.* vol. 3, is. 1, pp. 13–15. DOI: 10.1364/OL.3.000013
7. GURIN, O. V., DEGTYAREV, A. V., LEGENKYI, M. N., MASLOV, V. A., SVICH, V. A., SENYUTA, V. S. and TOPKOV, A. N., 2014. Generation of transverse modes with azimuthal polarization in a terahertz band waveguide laser. *Telecommunications and Radio Engineering*. vol. 73, is. 20, pp. 1819–1830. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i20.30
8. SHMAT'KO, A. A., 2008. *Millimeter-wave electron wave systems. Volume 1*. Kharkiv, Ukraine: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).
9. EGOROV, M. B. and SHMAT'KO, A. A., 1987. Scattering of the field of a linear distributed source on an irregular array in a waveguide with an arbitrary law of variation of its parameters. *Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Ser. A*. no. 6, pp. 42–45. (in Russian).
10. GAN, Q., FU, Z., DING, Y. J. and BARTOLI, F. J., 2008. Ultrawide-bandwidth slow-light system based on THz plasmonic graded metallic grating structures. *Phys. Rev. Lett.* vol. 100, is. 25, id. 256803. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.256803
11. XU, Y., FU, Y. and CHEN, H., 2015. Steering light by a sub-wavelength metallic grating from transformation optics. *Sci. Rep.* vol. 5, id. 12219. DOI: 10.1038/srep12219
12. VERSLEGERS, L., CATRYSSSE, P. B., YU, Z., WHITE, J. S., BARNARD, E. S., BRONGERSMA, M. L. and FAN, S., 2009. Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film. *Nano Lett.* vol. 9, is. 1, pp. 235–238. DOI: 10.1021/nl802830y
13. XU, Y., FU, Y. and CHEN, H., 2016. Planar gradient metamaterials. *Nat. Rev. Mat.* vol. 1, id. 16067. DOI: 10.1038/natrevmats.2016.67
14. FENG, D. and ZHANG, C., 2011. Optical focusing by planar lenses based on nano-scale metallic slits in visible regime. *Phys. Procedia*. vol. 22, pp. 428–434. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.11.067
15. LIN, H. and HUANG, C.-S., 2016. Linear variable filter based on a gradient grating period guided-mode resonance filter. *IEEE Photonics Technol. Lett.* vol. 28, is. 9, pp. 1042–1045. DOI: 10.1109/LPT.2016.2524655
16. SHI, H., WANG, C., DU, C., LUO, X., DONG, X. and GAO, H., 2005. Beam manipulating by metallic nano-slits with variant widths. *Opt. Exp.* vol. 13, is. 18, pp. 6815–6820. DOI: 10.1364/OPEX.13.006815

## REFERENCES

1. DZYUBENKO, M. I., KAMENEV, YU. E. and RADIONOV, V. P., 2017. Gas-discharge lasers of the terahertz range *Radiophys. Electron.* vol. 22, no. 3, pp. 58–80. (in Russian). DOI: 10.15407/revj2017.03.058
2. DEGTYAREV, A. V., MASLOV, V. A. and TOPKOV, A. N., 2016. Lasers of terahertz range with optical pumping. Chapter 11. In: A. E. HRAMOV, A. G. BALANOV, V. D. EREMKA, V. E. ZAPEVALOV and A. A. KORONOVSKIY, eds. *Generation and amplification of terahertz range*

17. CHEN, M., FAN, F., XU, S.-T. and CHANG, S.-J., 2016. Artificial high birefringence in all-dielectric gradient grating for broadband terahertz waves. *Sci. Rep.* vol. 6, id. 38562. DOI: 10.1038/srep38562
18. GURIN, O. V., DEGTYAREV, A. V., MASLOV, V. A., RYABYKH, V. N. and TOPKOV, A. V. 2016. Terahertz laser waveguide resonators with internal spherical mirrors. *Telecommunications and Radio Engineering.* vol. 75, is. 18, pp. 1665–1677. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i18.60.
19. DZYUBENKO, M. I., MASLOV, V. A. and RADIONOV, V. P., 2016. Applying of the flat circular metal gratings as spherical output mirrors of terahertz lasers. In: *9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW) Proceedings.* Kharkiv, Ukraine, 20-24 June, 2016. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538117
20. DZYUBENKO, M. I., MASLOV, V. A. and RADIONOV, V. P., 2017. *Azimuthal output mirror of the laser cavity.* Ukraine Patent No. 115126.
21. DZYUBENKO, M. I., RADIONOV, V. P., MASLOV, V. A. and ODARENKO, E. N., 2017. Plane circular gradient grating that combines the functions of a spherical mirror and a focusing lens. In: *IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS) Proceedings.* Kiev, Ukraine, 29-31 August, 2017. pp. 139–142. DOI: 0.1109/MRRS.2017.8075047
22. DZYUBENKO, M. I., MASLOV, V. A., ODARENKO, E. N. and RADIONOV, V. P., 2017. Planar Gradient Metamaterial with the Properties of Spherical Partially Transparent Terahertz Mirror. In: *Second International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017) Proceedings.* Odesa, Ukraine, September 11–15, 2017. pp. 189–192.
23. TAFLOVE, A. and HAGNESS, S. C., 2000. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method.* Norwood, MA, USA: Artech House, Ink.
24. OSKOOI, A. F., ROUNDY, D., IBANESCU, M., BERMEL, P., JOANNOPOULOS, J. D. and JOHNSON, S. G., 2010. MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method. *Comput. Phys. Commun.* vol. 181, is. 3, pp. 687–702. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.11.008

*M. I. Dzyubenko*<sup>1,3</sup>, *V. A. Maslov*<sup>2</sup>, *E. N. Odarenko*<sup>3,2</sup>, and *V. P. Radionov*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Ac. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

<sup>2</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

<sup>3</sup>Kharkiv National University of Radio Electronics, 14, Nauka Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine

#### PROSPECTS OF THE USE OF GRADIENT GRATES IN THE LASERS OF TERAHERTZ RANGE

*Purpose:* The improvement and development of terahertz radiation sources is required for the further development of the terahertz frequency range. Submillimeter lasers are one of the

few sources of terahertz radiation. Metal periodic structures are often used as output mirrors of these lasers. The periodic structure advantage is that by selection of its parameters it is possible to provide the optimal transmittance of the output mirror and the required polarization of laser radiation. The use of concave mirrors in a laser cavity is often required to reduce the diffraction loss and to reduce the output laser beam divergence. However, such mirrors are much more expensive and more complicated in manufacture than the flat ones. The periodic structure with a non-flat substrate is particularly difficult to manufacture. The aim of this work is to study the flat gradient metal gratings that possess the properties of spherical mirrors and lenses simultaneously.

*Design/methodology/approach:* Flat gradient metal gratings in the form of concentric rings with varying parameters in the radial direction are proposed for solving the focusing problem. The technique for modeling the phase characteristics of such annular gradient gratings is given. Simulation of the properties of a ring grating in which the distance between the rings decreases in the direction from the center to the edges is carried out.

*Findings:* The image of the change in the wave phase front which occurs when an electromagnetic field interacts with a gradient grating is obtained as a result of numerical simulation. The grating considered has the properties of a concave mirror and a focusing lens simultaneously. Such combination of gradient gratings properties allows to use them as output mirrors of terahertz lasers. This allows us to improve the energy and spatial-angular characteristics of the output radiation of terahertz lasers. *Conclusions:* Using the circular gradient gratings as output mirrors of terahertz lasers makes it possible to reduce the diffraction losses and divergence of the laser beam that allows to increase the efficiency of terahertz lasers.

*Key words:* terahertz range, laser, output mirror of a laser cavity, gradient gratings

*M. I. Дзюбенко*<sup>1,3</sup>, *В. О. Маслов*<sup>2</sup>, *Є. М. Одаренко*<sup>3,2</sup>, *В. П. Радіонов*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

<sup>3</sup>Харківський національний університет радіоелектроніки, пр-т. Науки, 14, м. Харків, 61166, Україна

#### ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ГРАДІЄНТНИХ РЕШТОК В ЛАЗЕРАХ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

*Предмет і мета роботи:* Для подальшого освоєння терагерцевого діапазону частот потрібен розвиток і вдосконалення джерел випромінювання, здатних працювати в цьому діапазоні. Одними з нечисленних джерел терагерцевого випромінювання є субміліметрові лазери. У якості вихідних дзеркал таких лазерів широко використовуються металеві періодичні структури. Перевагою періодичної структури є те, що шляхом підбору її параметрів можна забезпе-

чити оптимальний коефіцієнт пропускання вихідного дзеркала і необхідну поляризацію лазерного випромінювання. Для зниження дифракційних втрат і зменшення розходження вихідного лазерного пучка часто необхідно застосовувати увігнуті дзеркала в лазерному резонаторі. Однак такі дзеркала є значно дорожчими і складнішими у виготовленні, ніж плоскі. Особливо складно виконати періодичну структуру з неплоскою підкладкою. Метою роботи є дослідження плоских градієнтних металевих решіток, що мають властивості сферичних дзеркал і лінз одночасно.

*Методи і методологія:* Для вирішення проблеми фокусування запропоновано плоскі градієнтні металеві решітки у вигляді концентричних кілець зі змінними параметрами в радіальному напрямку. У роботі надається методика моделювання фазових характеристик таких кільцевих градієнтних решіток. Виконано моделювання властивостей кільцевої решітки, у якій відстань між кільцями зменшується в напрямку від центру до країв.

*Результати:* В результаті числового моделювання отримано картину зміни фазового фронту хвилі, яка виникає при взаємодії електромагнітного поля з градієнтною решіткою. Розглянута решітка має властивості увігнутого дзеркала і фокуруючої лінзи одночасно. Таке поєднання властивостей градієнтних решіток, у разі використання їх у якості вихідних дзеркал резонатора, дозволяє поліпшити просторово-кутові характеристики випромінювання терагерцевих лазерів.

*Висновок:* Використання кільцевих градієнтних решіток у якості вихідних дзеркал терагерцевих лазерів дає можливість знизити дифракційні втрати та зменшити розходження лазерного пучка, що дозволяє підвищити ефективність терагерцевих лазерів.

*Ключові слова:* терагерцевий діапазон, лазер, вихідне дзеркало резонатора, градієнтні решітки

*Стаття постуила в редакцію 21.08.2018*