

ТЕРАГЕРЦЕВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Моделирование выходных зеркал терагерцевых лазеров на основе кольцевых градиентных структур

М.И.Дзюбенко, В.А.Маслов, Е.Н.Одаренко, В.П.Радионо́в

Обосновано использование градиентных периодических структур, размещенных на плоской подложке и состоящих из концентрических металлических колец с изменяющимися в радиальном направлении параметрами, в качестве выходных зеркал терагерцевых лазеров. С помощью компьютерного моделирования показано, что при определенном изменении параметров такая структура имеет свойства вогнутого зеркала и фокусирующей линзы, что важно для выходных зеркал лазеров терагерцевого диапазона.

Ключевые слова: терагерцевый диапазон, азимутальная поляризация, градиентная решетка, выходное зеркало лазерного резонатора.

Градиентные периодические структуры [1–6], параметры которых изменяются в одном или в нескольких направлениях, могут изменять амплитудные, фазовые и поляризационные свойства взаимодействующего с ними электромагнитного излучения, что может использоваться в различных областях техники. Одним из перспективных применений таких структур является лазерная техника, где в качестве выходных зеркал терагерцевых (ТГц) лазеров традиционно используются различные периодические структуры. В частности, перспективной является периодическая структура в виде концентрических металлических колец, позволяющая получать лазерное излучение с азимутальной поляризацией, при которой вектор напряженности электрического поля перпендикулярен радиусу пучка [7]. В этой работе также обоснованы полезные свойства азимутальной поляризации и обнаружено, что выходное зеркало, более прозрачное в центральной части, позволяет повысить эффективность лазерной генерации. Кроме того, к существенному повышению эффективности ТГц-лазеров приводит снижение дифракционных потерь в резонаторе, чего можно достичь применением вогнутых зеркал, которые, однако, гораздо сложнее в изготовлении, чем плоские зеркала. Следовательно, перспективными являются плоские градиентные структуры, обладающие фокусирующими свойствами. Цель настоящей работы заключается в разработке и моделировании плоских периодических структур, которые при воздействии на них азимутально поляризованного лазерного

излучения обладают свойствами вогнутых зеркал и фокусирующих линз.

Особенностью периодических структур является то, что они вносят фазовый сдвиг в электромагнитную волну, величина которого зависит от параметров структуры [8]. Предложенная нами кольцевая градиентная периодическая структура [9] (рис. 1,а) состоит из концентрических металлических колец, расположенных на плоской прозрачной подложке. Параметры такой решетки изменяются в радиальном направлении, что приводит к изменению кривизны фазового фронта отраженных и прошедших сквозь решетку электромагнитных волн. Разработана методика моделирования таких изменений. При моделировании считается, что кольцевая решетка состоит из отдельных секторов, в которых проводники параллельны. Для расчета используются два диаметрально противоположных сектора, и условно считается, что длина проводников не ограничена (рис. 1,б). Это дает возможность с помощью апробированной методики расчета решеток, состоящих из параллельных проводников, определить фазовые изменения в диаметрально направлении.

Нами рассмотрена решетка диаметром 4 мм, состоящая из 21 металлического кольца шириной 20 мкм и толщиной 0.5 мкм, которые находятся на кварцевой подложке (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 4.5$) толщиной

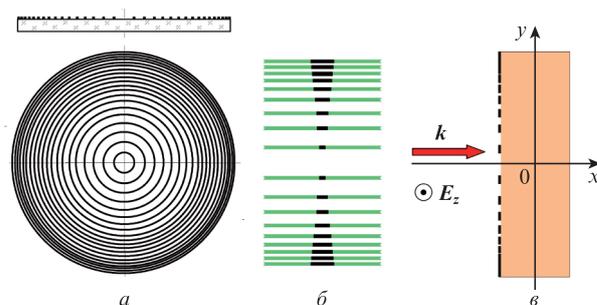


Рис. 1. Градиентная кольцевая решетка (а), модель для расчета, построенная на базе двух диаметрально противоположных секторов (б), и схема падения плоской монохроматической волны на градиентную решетку (в).

М.И.Дзюбенко, В.П.Радионо́в. Институт радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАНУ, Украина, 61085 Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12; e-mail: mid41@ukr.net, dzyubenko41@mail.ru
В.А.Маслов. Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразина, Украина, 61022 Харьков, пл. Свободы, 4; e-mail: v.a.maslov@karazin.ua
Е.Н.Одаренко. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина, 61000 Харьков, просп. Науки, 14; Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразина, Украина, 61022 Харьков, пл. Свободы, 4; e-mail: e.n.odarenko@gmail.com

Поступила в редакцию 21 ноября 2018 г., после доработки – 17 января 2019 г.

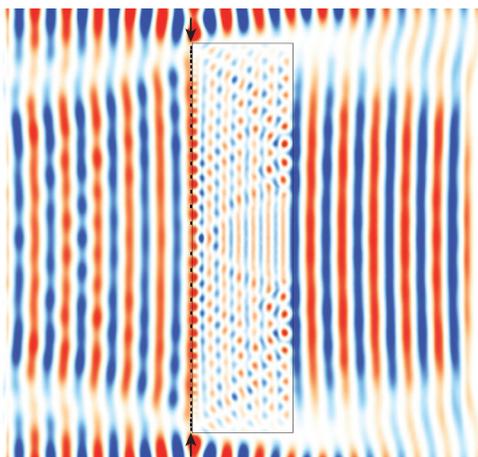


Рис.2. Амплитудное распределение напряженности электрического поля.

1 мм. Расстояние от центра до внутреннего кольца составляет 160 мкм. При удалении от центра расстояние между кольцами уменьшается с шагом 8 мкм. На рис.1,в представлены схематическое изображение градиентной решетки и соответствующая система координат. Плоская монохроматическая волна с поляризацией вдоль оси z и волновым вектором k падает на структуру в положительном направлении оси x . Численные расчеты в рамках двумерной модели проводились с использованием свободно распространяемого пакета МЕЕР на основе метода FDTD [10]. Расчетная сетка модели содержит 20 узлов на единицу длины (0.1 мм). Пространственное распределение амплитуды электрического поля, рассеянного на градиентной решетке, представлено на рис.2. Наблюдается фокусировка как прошедшего через структуру поля, так и отраженного от нее.

Для расчета фазового профиля рассеянного поля вычислялись действительная и мнимая части электрического поля в узлах расчетной сетки. Результаты расчетов представлены на рис.3. Кривая 1 соответствует полю, отраженному от градиентной решетки. Искривление фазового фронта приводит к фокусировке излучения аналогично фокусировке металлическим вогнутым зеркалом с радиусом кривизны 60 мм (кривая 2). Кривая 3 соответствует полю, прошедшему через структуру. В этом случае наблюдается более эффективная фокусировка. Следовательно, рассмотренная кольцевая градиентная решетка одновременно выполняет функции вогнутого зеркала и фокусирующей линзы.

При одинаковой разности фазовых сдвигов на краях и в центре кольцевой решетки большее искривление фазового фронта можно получить при ее меньшем наружном диаметре. С увеличением наружного диаметра градиентной кольцевой решетки минимально возможное фокусное расстояние растет. В реальных ТГц-лазерах для снижения дифракционных потерь достижимой с помощью рассматриваемой линзы фокусировки вполне достаточно. Следует отметить, что, задавая различную последовательность изменения периодичности кольцевой решетки, можно получать большое разнообразие фокусирующих свойств. Очевидно, что при обратном радиальном измене-

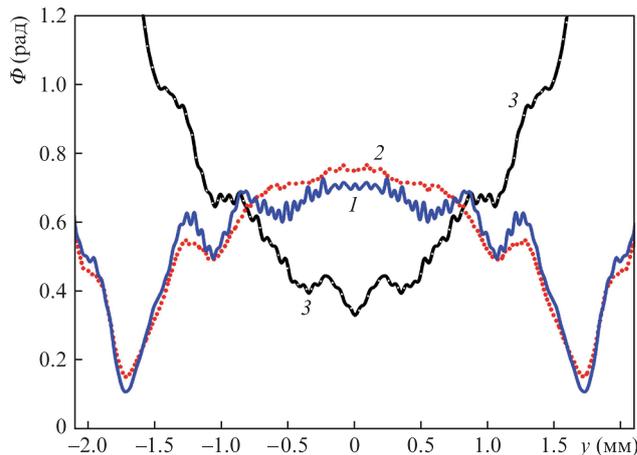


Рис.3. Поперечные распределения фаз электрических полей: 1 – отраженного от градиентной решетки; 2 – отраженного от вогнутого зеркала; 3 – прошедшего через градиентную решетку.

нии параметров градиентной решетки она может приобрести свойства выпуклого зеркала и рассеивающей линзы, что также может использоваться на практике.

В результате проведенных исследований установлено, что плоские круговые градиентные решетки, коэффициент заполнения которых увеличивается от центра к краям, обладают свойствами вогнутых зеркал и фокусирующих линз, что перспективно для их применения в качестве выходных зеркал ТГц-лазеров. Такие зеркала дают возможность генерировать лазерное излучение с азимутальной поляризацией и обеспечивать требуемую каустику поля в резонаторе, позволяющую снизить дифракционные потери в нем и частично компенсировать расходимость выходного пучка. Повышенная прозрачность в центральной части зеркала способствует увеличению эффективности лазерной генерации. Представленная методика моделирования облегчает расчет свойств таких периодических структур. Кольцевые градиентные решетки могут использоваться и в лазерах других диапазонов, а также в различных устройствах, например в качестве рефлекторов антенн.

1. Feng D., Zhang C. *Phys. Procedia*, **22**, 428 (2011).
2. Jun Luo, Honglin Yu, Maowen Song, Zuojun Zhang. *Opt. Lett.*, **39** (8), 2229 (2014).
3. Quanlong Yang, Jianqiang Gu, Dongyang Wang, Xueqian Zhang, Zhen Tian, Chunmei Ouyang, Ranjan Singh, Jianguang Han, Wei Zhang. *Opt. Express*, **22** (21), 25931 (2014).
4. Di Feng, Chunxi Zhang, Lishuang Feng, Yuanhong Yang. *J. Electromagn. Analys. Applicat.*, **4**, 485 (2012).
5. Huan Yi1, Shi-Wei Qu, Bao-Jie Chen, Xue Bai, Kung Bo Ng, Chi Hou Chan. DOI:10.1038/s41598-017-03752-3.
6. Xu Y., Fu Y., Chen H. *Nature Rev. Mater.*, **1**, 16067 (2016).
7. Gurin O.V., Degtyarev A.V., Legenkyi M.N., Maslov V.A., Svich V.A., Senyuta V.S., Topkov A.N. *Telecommun. Radio Eng.*, **73** (20), 1819 (2014).
8. Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Масалов С.А., Сиренко Ю.К. *Резонансное рассеяние волн. Т.1 Дифракционные решетки* (Киев: Наукова думка, 1986).
9. Dzyubenko M.I., Radionov V.P., Maslov V.A., Odarenko E.N., in *Proc. of the IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS)* (Kiev, Ukraine, 2017, pp.139-142).
10. Oskooi A.F., Roundy D., Ibanescu M., et al. *Comput. Phys. Commun.*, **181**, 687 (2010).