

Оптимизация, изготовление и исследование кремниевой бинарной субволновой цилиндрической линзы терагерцового диапазона

С.И. Харитонов^{1,2}, В.С. Павельев^{1,2}, Н.Л. Казанский^{1,2}, Ю.С. Стрелков^{1,2}, К.Н. Тукмаков¹,
А.С. Решетников¹, С.В. Ганчевская², В.В. Герасимов^{3,4}, Б.А. Князев^{3,4}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34;

² ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151;

³ Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 1;

⁴ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева, д. 11

Аннотация

Рассмотрена задача оптимизации и изготовления субволновой бинарной цилиндрической пропускающей дифракционной линзы с фокусным расстоянием $f=300$ мм для длины волны $\lambda=141$ мкм. В качестве материала подложки дифракционной линзы использовался высокоомный кремний. Расчётное значение угла падения освещающего пучка составляло $\pi/6$. Параметрами оптимизации были выбраны высота профиля дифракционной линзы и коэффициент заполнения штриха. Главной целью оптимизации конструкции было увеличение дифракционной эффективности линзы. Расчёт дифракционной эффективности дифракционной линзы осуществлялся методом Фурье-мод. Дифракционная линза изготовлена методом плазмохимического травления (Бош-процесс) поверхности кремниевой подложки. Оценка дифракционной эффективности рассчитанной линзы составила $e=70\%$. Однако экспериментально измеренная дифракционная эффективность была значительно меньше расчётной. В статье приведён анализ снижения дифракционной эффективности, связанного с 1) технологическими погрешностями формирования дифракционного микрорельефа; 2) деструктивной интерференцией излучения в случае отсутствия учёта толщины кремниевой подложки при расчёте микрорельефа.

Приведены рекомендации по расчёту микрорельефа с учётом толщины подложки.

Ключевые слова: бинарная линза, субволновый микрорельеф, терагерцовое излучение, дифракционные оптические элементы.

Цитирование: Харитонов, С.И. Оптимизация, изготовление и исследование кремниевой бинарной субволновой цилиндрической линзы терагерцового диапазона / С.И. Харитонов, В.С. Павельев, Н.Л. Казанский, Ю.С. Стрелков, К.Н. Тукмаков, А.С. Решетников, С.В. Ганчевская, В.В. Герасимов, Б.А. Князев // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 1. – С. 62-67. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1194.

Citation: Kharitonov SI, Pavelyev VS, Kazanskiy NL, Strelkov YS, Tukmakov 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.

Введение

Появление источников мощного терагерцового излучения, таких как лазеры на свободных электронах [1], привело к необходимости формирования элементной базы для управления характеристиками мощных пучков терагерцового излучения. Известны результаты исследования пропускающих [2–5] и отражающих [6] элементов, предназначенных для фокусировки мощного терагерцового пучка в заданные двумерные [4] и трёхмерные [7] области, а также для формирования мощных терагерцовых пучков с заданными поперечно-модовым составом [8] и поляризационным состоянием [9]. В качестве материала подложки пропускающих силовых терагерцовых эле-

ментов в [2–5, 7–9] использовался высокорезистивный кремний [10]. В работах [5, 6] приведены результаты исследования пропускающей кремниевой цилиндрической дифракционной линзы и отражающей цилиндрической линзы соответственно. Цилиндрические линзы играют большую роль при построении сканирующих терагерцовых систем. Пропускающие кремниевые линзы со ступенчатым рельефом могут быть изготовлены с помощью технологий литографии [2, 3] или технологии лазерной абляции [11]. Однако дифракционная эффективность бинарных (двухуровневых) линз с шириной зон Френеля, значительно превышающих длину волны, составляет всего 41%, в то время как изготовление линз с большим количеством уровней («ступенек») рельефа и, соот-

ветственно, большей дифракционной эффективностью с помощью литографических технологий требует применения дорогостоящей и сложной процедуры [12]. В качестве альтернативы технологиям литографии в работе [5] была рассмотрена технология лазерной абляции, позволяющая формировать непрерывный дифракционный микрорельеф на поверхности кремниевой подложки. Другим вариантом относительно недорогого изготовления линз с более высокой дифракционной эффективностью является оптимизация и изготовление субволнового бинарного дифракционного микрорельефа на поверхности кремниевой подложки.

Ранее были хорошо описаны теоретические подходы к решению задачи дифракции на субволновых бинарных структурах [13, 14]. Целью нашей работы является расчёт, изготовление и исследование методами численного и натурального экспериментов кремниевой цилиндрической дифракционной линзы с субволновым дифракционным микрорельефом.

1. Постановка задачи

Рассматривалась работа бинарной цилиндрической дифракционной линзы (ДЛ), *i*-я дифракционная зона которой представлена на рис. 1.

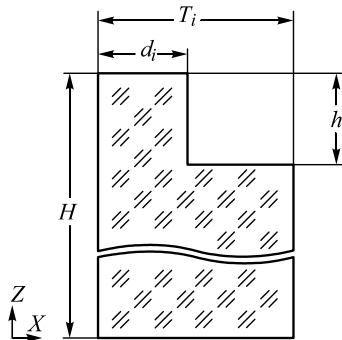


Рис. 1. Изображение *i*-й зоны ДЛ

На рис. 1 *H* – высота подложки, *h* – глубина травления штриха, *d_i* – ширина штриха *i*-й зоны, *T_i* – ширина *i*-й зоны. Известно [13, 14], что при падении света под углом $\alpha = 30^\circ$ на бинарную дифракционную решётку с периодом штриха, приблизительно равным λ , среди прошедших дифракционных порядков остаются только 0 и -1, а остальные являются быстро затухающими. Таким образом, в качестве целевой функции будем использовать значение дифракционной эффективности в минус первом порядке для таких зон. Параметрами оптимизации выберем коэффициент заполнения штриха *ff_i* и глубину травления штриха *h*. Коэффициент заполнения *ff_i* определим как отношение ширины штриха *d_i* к ширине зоны *T_i*: $ff_i = d_i / T_i$.

Если считать, что каждая отдельная зона ДЛ будет иметь свою глубину травления и коэффициент заполнения, то конечная задача будет иметь высокую вычислительную сложность. Увеличение вычислитель-

ной сложности приведёт к быстрому росту временных затрат на вычисления. Кроме того, такой микрорельеф уже будет невозможно реализовать с помощью однократного литографического травления подложки [12]. Поэтому ограничивались целевой функцией, которая зависела всего от двух переменных – коэффициента заполнения и глубины травления. Эта пара параметров предполагалась одной и той же для всех зон ДЛ. Выбранный размер бинарной структуры, состоящей из набора зон рис. 1, вдоль оси *x* составлял 50 мм. Высота подложки составляла 1 мм. Длина волны падающего излучения выбиралась равной $\lambda = 141$ мкм. В качестве материала ДЛ выбирался высокоомный кремний с показателем преломления $n = 3,42$. В качестве освещающего пучка рассматривался Гауссов пучок, падающий на плоскость ДЛ под углом $\alpha = 30^\circ$. Предполагалось, что плоскость фокусировки должна располагаться в $f = 300$ мм от линзы в -1 порядке дифракции.

2. Численный эксперимент

Перед началом численного эксперимента было необходимо выбрать начальное приближение для параметров ДЛ и определить ширину зон линзы. В работах [15, 16] описаны подходы для расчёта ширины зон. В качестве значений начальных параметров выбирались $h = 0,25\lambda$ и $ff = 0,5$.

Ширина зоны должна удовлетворять уравнению [16]:

$$\varphi_0 + k_0 \sqrt{T_n^2 + f^2} + 2k_0 \sin(\alpha) T_n = 2\pi n, \quad (1)$$

где φ_0 – начальная фаза эйконала, k_0 – волновое число, T_n – координата границы зоны с индексом *n*, *f* – фокусное расстояние, α – угол падения пучка, *n* – номер зоны. Для расчета ДЛ использовалась функция оптимизации `fmincon`, реализованная в среде MATLAB.

В результате работы оптимизационной процедуры было найдено решение, соответствующее значению дифракционной эффективности элемента $e = 70\%$ (определяется как величина падающего потока, который дифрагирует в заданном порядке дифракции). Полученные значения параметров при этом составили $h = 63$ мкм, $ff = 0,3$. Работа линзы оценивалась с помощью метода локальной аппроксимации [16]. Для обозначенных выше параметров распределение модуля вектора Умова–Пойнтинга в области фокуса имело вид, приведённый на рис. 2. Асимметрия фокального распределения (рис. 2) обусловлена тем, что пучок падает на ДЛ под углом. ДЛ состояла из 320 зон.

Зависимость дифракционной эффективности минус первого порядка от ширины зоны представлена на рис. 3. На рис. 3 вдоль оси *X* отложены значения ширины *i*-й зоны ДЛ в длинах волн ($\lambda = 141$ мкм).

Видно, что для параметров, полученных в результате оптимизации, дифракционная эффективность практически не опускается ниже $e = 60\%$ и возрастает

по мере увеличения ширины зоны, составляя в среднем $e = 70\%$. Однако полученные позже результаты экспериментального исследования рассчитанной и изготовленной линзы показали значительно меньшее значение измеренной дифракционной эффективности. Было сделано предположение, что основной причиной сильного снижения дифракционной эффективности является деструктивная интерференция в объёме оптически плотной пластины из кремния, толщина пластины никак не учитывалась в ходе расчёта ДЛ.

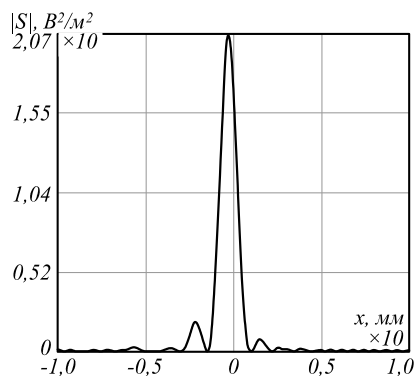


Рис. 2. Модуль вектора Умова–Пойнтинга в фокальной области бинарной дифракционной линзы

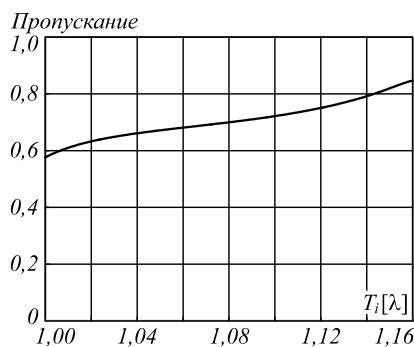


Рис. 3. Зависимость дифракционной эффективности минус первого порядка от ширины зоны

Для оценки снижения дифракционной эффективности был поставлен численный эксперимент, в ходе которого рассматривалась ДЛ с выбранными параметрами рельефа. Начальная толщина подложки составляла 1 мм, исследовалось изменение дифракционной эффективности при отклонении от этой толщины в пределах ± 10 мкм. Это отклонение соответствует ширине области определения параметра высоты рельефа решётки, при котором эффективность всё ещё больше 20%. Так, при увеличении толщины, как и при её уменьшении (рис. 4), наблюдается многократное падение дифракционной эффективности.

3. Натурный эксперимент

Изготовление субволновой цилиндрической линзы с найденными параметрами осуществлялось методом плазмохимического травления (Бош-процесс) поверхности подложки из высокоомного кремния [3]. Параметры элемента – апертура $D = 50$ мм, рабочая

длина волны $\lambda = 141$ мкм, угол падения освещающего пучка – $\alpha = 30^\circ$, тип микрорельефа – бинарный субволновый. Расчётная высота микрорельефа – $h = 63$ мкм, ширины зон менялись в диапазоне от λ до $1,16\lambda$. Фокусное расстояние линзы $f = 300$ мм. Из-за большой глубины травления имело место подтравливание стенок микрорельефа. По результатам исследования получившегося микрорельефа методом микроинтерферометрии (использовался микроинтерферометр белого света WLI-DMR производства Института Фраунгофера, г. Йена, Германия) величина угла подтравливания составила примерно 13° . Для оценки параметров реальной ДЛ с наклонными стенками использовался метод [5]. Оказалось, что для изготовленной ДЛ дифракционная эффективность из-за подтравки должна снизиться приблизительно на 5%. Изготовленный субволновый элемент исследовался методами натурального эксперимента. В качестве источника когерентного терагерцового излучения использовался Новосибирский лазер на свободных электронах (НЛСЭ, ИЯФ СО РАН) [1]. Схема эксперимента показана на рис. 5. Длина волны составляла $\lambda = 140,6$ мкм (по монохроматору НЛСЭ). Излучение падало под углом 30° к нормали поверхности элемента со стороны гладкой (без микрорельефа) поверхности. Толщина кремниевой подложки, на которой находился реализованный профиль, отличалась от расчетного значения, использованного выше в модельном примере (1 мм), и составляла $0,96 \pm 0,01$ мм. Для длины волны $\lambda = 141$ мкм излучение должно собираться в фокусе $f = 300$ мм под углом $\alpha = 30^\circ$. Для наблюдения профиля пучка использовался матричный пироэлектрический приёмник Ругосам IV, а поляризация на входе задавалась фотолитографическим плёночным поляризатором. Во всех измерениях вектор напряжённости электрического поля падающего излучения был параллелен штрихам решётки.

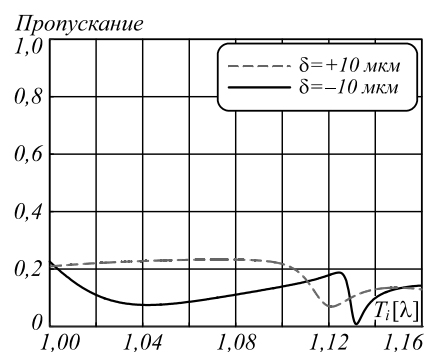


Рис. 4. Зависимость дифракционной эффективности минус первого порядка от ширины зоны при увеличении толщины кремниевой пластины на ± 10 мкм

Расстояние от места падения пучка на линзу до области с максимальной энергией фокуса составило примерно 295 ± 10 мм, что находится в хорошем соответствии с расчётным значением. Небольшая точность экспериментального определения данного рас-

стояния свидетельствует о большой длине каустики фокуса линзы. Ни рис. 6 показано изображение фокуса, измеренного на матричном приёмнике в данной геометрии при угле падения $\alpha = 30^\circ$. Фокус был немного наклонён к вертикальной оси (под углом примерно $\alpha = 9^\circ$). Возможно, это произошло из-за того, что вектор электрического поля был немного отклонён от линий штрихов элемента. В целом, это отклонение существенно не влияло на результат.

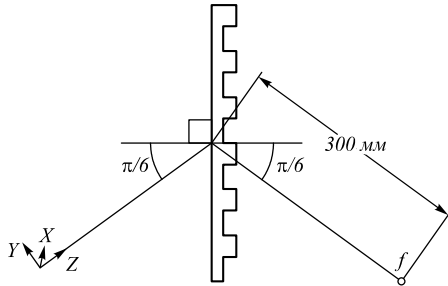


Рис. 5. Схема эксперимента

На рис. 7 показано изображение пучка, прошедшего напрямую через элемент (без отклонения от направления падающего пучка), а на рис. 8 – профиль падающего пучка. По измеренным распределениям интенсивности (рис. 6–8) была оценена суммарная интенсивность фокального пятна I_f (по эллипсу с размером $3,4 \times 24 \text{ мм}^2$), прошедшего пучка I_t (по всей площади матрицы приёмника) и падающего пучка I_0 . Данные величины составили примерно $I_f \approx 35,6$, $I_t \approx 113,7$ и $I_0 \approx 575,6$ отн. ед. соответственно. Исходя из этих данных, была оценена энергетическая эффективность – как отношение $I_f/I_0 \approx 6,2 \pm 0,5 \%$, а дифракционная эффективность, как $I_f/(I_t + I_r) \approx 24 \pm 1 \%$, где I_r – суммарная интенсивность отражённого поля. Погрешность измерений составила $\approx 5 \%$, которая связана в значительной степени с колебаниями интенсивности падающего излучения ЛСЭ. Полученный

результат для дифракционной эффективности согласуется с расчётами с учётом многолучевой интерференции в оптической системе линза–подложка (волновод) с толщиной подложки, отличающейся на 10 мкм от значения, при котором получены оптимальные параметры (см. рис. 4). Следовательно, основной источник значительного расхождения расчётной эффективности при оптимальных параметрах линзы (70%) с экспериментальным значением – деструктивная интерференция излучения в подложке (играющей роль волновода), на которой изготовлена кремниевая линза. Таким образом, при использовании описываемого подхода к расчёту пропускающих фокусирующих элементов необходимо дополнительно учитывать толщину подложки, используемой для изготовления элемента.

Заключение

Проведена оптимизация параметров бинарного субволнового микрорельефа цилиндрической ДЛ терагерцового диапазона. Для ДЛ с рабочей длиной волны $\lambda = 141 \text{ мкм}$, фокусным расстоянием $f = 300 \text{ мм}$ и расчётным значением угла падения освещающего пучка $\alpha = 30^\circ$ глубина травления зон и коэффициент заполнения оказались равны соответственно $h = 64 \text{ мкм}$, $ff = 0,3$. Рассчитанная дифракционная эффективность линзы с таким микрорельефом составила 70%. Дифракционная линза была изготовлена с помощью технологии плазмохимического травления (Бош-процесс) поверхности подложки из высокоомного кремния. Изготовленный микрорельеф был исследован методом интерферометрии белого света. Было проведено численное моделирование сформированного микрорельефа с учётом имеющихся технологических погрешностей изготовления. Изготовленная ДЛ была исследована методом натурального эксперимента. В качестве источника излучения использовался Новосибирский лазер на свободных электронах (НЛСЭ).

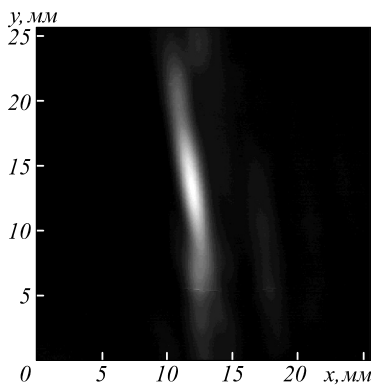


Рис. 6. Профиль фокуса на расстоянии $f = 295 \text{ мм}$ (наблюдаемый под $\alpha = 30^\circ$); здесь и далее размер кадра равен $25,6 \times 25,6 \text{ мм}^2$

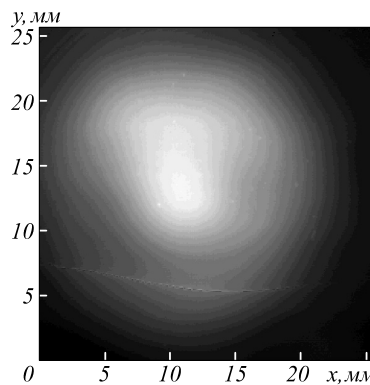


Рис. 7. Изображение пучка, прошедшего напрямую через элемент (без отклонения от направления падающего пучка)

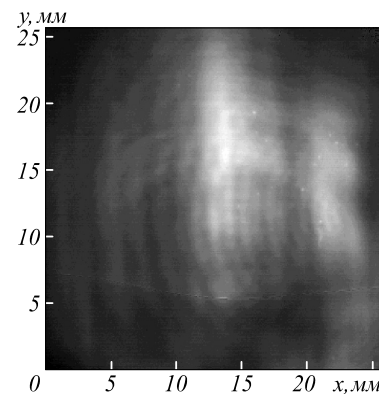


Рис. 8. Профиль падающего пучка ЛСЭ

Эксперимент продемонстрировал фокусирующие способности созданного элемента, экспериментальная оценка фокусного расстояния находится в хоро-

шем соответствии с расчётным фокусным расстоянием. Однако экспериментальная оценка дифракционной эффективности была значительно меньше рас-

чётной. Расхождение экспериментального и численного результата было в значительной степени обусловлено неравномерностью толщины кремниевой пластины. Такая неравномерность приводит к набегу фаз, пропорциональному 2π , которой, в свою очередь, может существенно снизить эффективность [17]. В статье приведён анализ снижения дифракционной эффективности, связанного с 1) технологическими погрешностями формирования дифракционного микрорельефа; 2) деструктивной интерференцией излучения в случае отсутствия учёта толщины кремниевой подложки при расчёте микрорельефа. Приведены рекомендации по расчёту микрорельефа с учётом толщины подложки.

Отметим, что обобщение описанного подхода на двумерный случай позволит решить задачу фокусировки лазерного излучения в двумерную область с помощью бинарного субволнового дифракционного оптического элемента.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-20202) на уникальной установке «Новосибирский лазер на свободных электронах» с использованием оборудования «Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения».

References

- [1] Kulipanov GN, Bagryanskaya EG, Chesnokov EN, Choporova YuYu, Gerasimov VV, Getmanov YaV, Kiselev SL, Knyazev BA, Kubarev VV, Peltek SE, Popik VM, Salikova TV, Scheglov MA, Seredniakov SS, Shevchenko OA, Skrinsky AN, Veber SL, Vinokurov NA. Novosibirsk free electron laser-facility description and recent experiments. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol* 2015; 5(5): 798-809. DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2453121.
- [2] Walsby ED, Wang S, Xu J, Yuan T, Blaikie R, Durbin SM, Zhang X-C, Cumming DRS. Multilevel silicon diffractive optics for terahertz waves. *J Vac Sci Technol B* 2002; 20(6): 2780-2783. DOI: 10.1116/1.1518021.
- [3] Agafonov AN, Volodkin BO, Kaveev AK, Knyazev BA, Kropotov GI, Pavel'ev VS, Soifer VA, Tukmakov KN, Tsygankova EV, Choporova YuYu. Silicon diffractive optical elements for high-power monochromatic terahertz radiation. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2013; 49(2): 189-195. DOI: 10.3103/S875669901302012X.
- [4] Komlenok MS, Kononenko TV, Konov VI, Choporova YuYu, Osintseva ND, Knyazev BA, Pavelyev VS, Tukmakov KN, Soifer VA. Silicon diffractive optical element with piecewise continuous profile to focus high-power terahertz radiation into a square area. *J Opt Soc Am B* 2021; 38(8): B9-B13. DOI: 10.1364/JOSAB.425286.
- [5] Kononenko TV, Knyazev BA, Sovyk DN, Pavelyev VS, Komlenok MS, Komandin GA, Konov VI. Silicon kinoform cylindrical lens with low surface roughness for high-power terahertz radiation. *Opt Laser Technol* 2020; 123: 105953. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105953.
- [6] Agafonov AN, Knyazev BA, Pavelyev VS, Akhmetova EI, Platonov VI. Elements of the terahertz power reflective optics with free-form surfaces. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2019; 55(2): 148-153. DOI: 10.3103/S8756699019020067.
- [7] Agafonov AN, Volodkin BO, Kachalov DG, Knyazev BA, Kropotov GI, Tukmakov KN, Pavelyev VS, Tsyypishka DI, Choporova YuYu, Kaveev AK. Focusing of Novosibirsk Free Electron Laser (NovoFEL) radiation into paraxial segment. *J Mod Opt* 2016; 63(11): 1051-1054. DOI: 10.1080/09500340.2015.1118163.
- [8] Pavelyev VS, Choporova YuYu, Osintseva ND, Tukmakov KN, Knyazev BA. Control of transverse mode content and polarization structure of terahertz coherent beams. *Computer Optics* 2019; 43(6): 1103-1108. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1103-1108.
- [9] Pavelyev VS, Degtyarev SA, Tukmakov KN, Reshetnikov AS, Knyazev BA, Choporova YuYu. Silicon subwavelength axicons for terahertz beam polarization transformation. *J Phys Conf Ser* 2021; 1745: 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1745/1/012022.
- [10] Rogalin V, Kaplunov I, Kropotov G. Optical materials for the THz range. *Opt Spectrosc* 2018; 125: 1053-1064. DOI: 10.1134/S0030400X18120172.
- [11] Komlenok MS, Volodkin BO, Knyazev BA, Kononenko VV, Kononenko TV, Konov VI, Pavelyev VS, Soifer VA, Tukmakov KN, Choporova YuYu. Fabrication of a multilevel THz Fresnel lens by femtosecond laser ablation. *Quantum Electron* 2015; 45(10): 933-936. DOI: 10.1070/QE2015v045n10ABEH015890.
- [12] Volkov AV, Kazanskiy NL, Soifer VA, Uspleneyev GV. Technology of DOE fabrication. In Book: Soifer VA, ed. *Methods of computer optics* [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2000: 239-310.
- [13] Soifer VA, ed. *Diffraction nanophotonics* [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2011. ISBN: 978-5-9221-1237-6.
- [14] Doskolovich LL Calculation of diffraction gratings within the framework of a rigorous electromagnetic theory [In Russian]. Samara: Samara State University Publishing House; 2007. ISBN: 978-5-7883-0607-0.
- [15] Doskolovich LL, Kharitonov SI, Kazansky NL, Tulupova EA, Skuratov SA. Asymptotic solutions of the Helmholtz equation for pseudoperiodic structures. *Computer Optics* 2005; 27: 50-55.
- [16] Doskolovich LL, Tyavin EV. Designing binary diffraction gratings with etching wedge. *Computer Optics* 2005; 27: 17-20.
- [17] Savelyev DA. The comparison of laser radiation focusing by diffractive axicons and annular gratings with variable height using high-performance computer systems. *2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2021*: 2709-2716. DOI: 10.1109/PIERS53385.2021.9694860.

Сведения об авторах

Харитонов Сергей Иванович, 1961 года рождения. Доктор физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, ведущий научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. 1984 г. – окончил физический факультет Самарского государ-

ственного университета. 1993 г. – защитил кандидатскую диссертацию на тему «Асимптотические методы дифракционного расчёта фокусаторов лазерного излучения». 2010 г. – защитил докторскую диссертацию на тему «Асимптотические методы расчёта дифракции когерентного электромагнитного излучения на дифракционных оптических элементах». Область научных интересов: дифракционная, квантовая оптика, физика плазмы. В списке научных работ С.И. Харитонova 87 статей, 5 авторских свидетельств и патентов. E-mail: prognoz2007@gmail.com.

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

Сведения об авторе **Казанский Николай Львович** см. стр.47 этого номера.

Стрелков Юрий Станиславович, 1992 года рождения, в 2016 окончил магистратуру Самарского университета по специальности «Прикладная математика и физика», работает младшим научным сотрудником лаборатории дифракционной оптики. Область научных интересов: дифракционная оптика, радиоэлектроника, компьютерная графика. E-mail: ghost_strelkov@mail.ru.

Тукмаков Константин Николаевич, инженер кафедры нанотехнологий Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: производство микро- и наноструктур, технология фокусированных ионных пучков. E-mail: tukmakov.k@gmail.com.

Решетников Антон Сергеевич, старший лаборант кафедры нанотехнологий Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: изготовление микро- и наноструктур. E-mail: ReshetnikovAntonio@yandex.ru.

Ганчевская София Владиславовна, 1992 года рождения, в 2015 получила степень магистра Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королёва по специальности «Прикладные математика и физика». Работает ассистентом кафедры технической кибернетики Самарского университета, инженером лаборатории микро- и нанотехнологий. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическая микроманипуляция, технология изготовления дифракционных оптических элементов. E-mail: sofi@smr.ru.

Герасимов Василий Валерьевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прикладной электродинамики Новосибирского государственного университета. Область научных интересов: оптика и фотоника, терагерцовое и инфракрасное излучение, метаматериалы, биомедицинские приложения. E-mail: v.v.gerasimov3@gmail.com.

Князев Борис Александрович, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера, заведующий научно-исследовательской лабораторией прикладной электродинамики Новосибирского государственного университета. Область научных интересов: оптика, спектроскопия, лазеры, терагерцовое излучение, физика плазмы, мощные пучки заряженных частиц. E-mail: ba_knyazev@phys.nsu.ru.

ГРНТИ: 29.35.33

Поступила в редакцию 15 июля 2022 г. Окончательный вариант – 11 октября 2022 г.

Optimization, fabrication and characterization of a binary subwavelength cylindrical terahertz lens

S.I. Kharitonov^{1,2}, V.S. Pavelyev^{1,2}, N.L. Kazanskiy^{1,2}, Y.S. Strelkov^{1,2}, K.N. Tukmakov¹, A.S. Reshetnikov¹,
S.V. Ganchevskaya^{1,2}, V.V. Gerasimov^{3,4}, B.A. Knyazev^{3,4}

¹IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

²Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34,

³Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova St. 1;

⁴Budker Institute of Nuclear Physics, 630090, Novosibirsk, Russia, Lavrentiev Ave 11

Abstract

A problem of optimizing the subwavelength microrelief of a binary cylindrical transmissive diffractive lens (DL) with a 300-mm focal length for a wavelength of $\lambda = 141 \mu\text{m}$ was considered. High-resistivity silicon was chosen as the DL substrate material. The angle of incidence of the illuminating beam was taken to be $\pi/6$. The optimization parameters were the height of the DL profile and the fill factor of the groove. The main goal of optimizing the design was to increase the diffraction efficiency of the lens. The DL diffraction efficiency was calculated using a Fourier mod method. The DL was fabricated by plasma-chemical etching (Bosch process) of the surface of a silicon substrate. The diffraction efficiency of the calculated lens was estimated to be 70%. However, a full-scale experiment showed the real efficiency to be much lower. These differences are related to both errors in the manufacturing process of the DL and non-ideal thickness parameters of the silicon wafers.

Keywords: binary lens, subwavelength microrelief, terahertz radiation, diffractive optical elements.

Citation: Kharitonov SI, Pavelyev VS, Kazanskiy NL, Strelkov YS, Tukmakov 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.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-72-20202) and conducted using a unique installation "Novosibirsk free electron laser" using equipment "Siberian Center for Synchrotron and Terahertz Radiation".

Authors' information

Sergey Ivanovich Kharitonov (b. 1961) leading researcher of Diffractive Optics laboratory in the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Doctor of Physical and Mathematical Sciences. 1984 – graduated from Physics department of Samara State University (presently, Samara National Research University). 1993 – defended his dissertation “Asymptotic methods of calculation of the diffraction of laser radiation focuser”. 2010 – defended his doctoral thesis on “Asymptotic methods for calculating the diffraction of coherent electromagnetic radiation in diffractive optical elements”. Research interests: diffraction, quantum optics, plasma physics. The list of S.I. Kharitonov scientific papers includes 87 articles, 5 patents. E-mail: prognoz2007@gmail.com.

Vladimir Sergeevich Pavelyev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, head of Nanoengineering department of Samara National Research University, principal researcher of the IPSI RAS. Research interests: diffractive microoptics, optical waveguides, nanophotonics, optical metamaterials synthesis, technologies for forming of micro- and nanostructures. E-mail: nano@ssau.ru.

Nikolay Lvovich Kazanskiy graduated with honors (1981) from Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara National Research University), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Mathematics (1996) degrees from Samara National Research University. He is the director of Image Processing Systems Institute of the RAS - Branch of the Federal Scientific-Research Centre "Crystallography and Photonics" of the Russian Academy of Sciences, also holding a part-time position of a professor at Technical Cybernetics department of Samara National Research University. He is a member of OSA, SPIE and IAPR. He co-authored 290 scientific papers, 14 monographs, 57 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, computer vision, optical sensors, mathematical modeling, lighting devices design, and nanophotonics. Website: <http://www.ipsiras.ru/staff/kazanskiy.htm>. E-mail: kazanskiy@ssau.ru.

Yury Stanislavovich Strelkov (b. 1992) is a postgraduate student of Samara University. He graduated (2016) with a master's degree in Applied Mathematics and Physics. At present, he is a junior researcher of Diffraction Optics Laboratory. The area of interests includes diffraction optics, radio electronics and computer graphics. E-mail: ghost_strelkov@mail.ru.

Konstantin Nickolaevich Tukmakov, engineer of Nanoengineering department, researcher of REC "Nanotechnology" of Samara National Research University University. Research interests: fabrication of micro- and nanostructures, technology focused ion beams. E-mail: tukmakov.k@gmail.com.

Anton Sergeevich Reshetnikov, senior laboratory assistant of Nanoengineering department of Samara National Research University. Research interests: fabrication of micro- and nanostructures. E-mail: ReshetnikovAntonio@yandex.ru.

Sofiya Vladislavovna Ganchevskaya (b. 1992), graduated from Samara State Aerospace University in 2015, majoring in Applied Mathematics and Physics. Currently she works as an assistant professor of Technical Cybernetics subdepartment of Samara University. Her research interests: diffractive optics, optical manipulation, manufacturing technology of diffractive optical elements. E-mail: sofi@ipsiras.ru.

Vasily Valerievich Gerasimov, PhD in Physics and Mathematics, senior researcher of the Budker Institute of Nuclear Physics, senior researcher of the Research Laboratory of Applied Electrodynamics, Novosibirsk State University. Research interests: optics and photonics, terahertz and infrared radiation, metamaterials, biomedical applications. E-mail: v.v.gerasimov3@gmail.com.

Boris Aleksandrovich Knyazev, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, principal researcher at Budker Institute of Nuclear Physics and Head of Laboratory of Applied Electrodynamics at Novosibirsk State University. Research interests: optics, spectroscopy, lasers, terahertz radiation, plasma physics, high-power electron and ion beams. E-mail: ba_knyazev@phys.nsu.ru.

Received July 15, 2022. The final version – October 11, 2022.
