

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛИНА ТРАВЛЕНИЯ НА ФОКУСИРОВКУ ИЗЛУЧЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ МИКРОЛИНЗАМИ С ВЫСОКОЙ ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРОЙ

Д.Л. Головашкин¹, Е.Н. Кашайкина², Ю.А. Орехова²,

¹ - Институт систем обработки изображений РАН,

² - Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева

Аннотация

Работа посвящена исследованию влияния клина травления на фокусировку излучения дифракционными микролинзами с апертурой 16 длин волн и числовой апертурой 0,71. Рассматриваются случаи клина травления, характерные для жидкостной химической и плазменно-химической технологий.

Введение

Развитие дифракционной оптики определяется как разработкой новых методов расчета, так и совершенствованием технологий формирования оптического микрорельефа. Особенный интерес представляют задачи, возникающие на стыке указанных направлений, когда расчет дифракционных элементов производится с учетом возможностей технологии их изготовления (например, фазовая функция выбирается из множества технологически реализуемых [1]), а новые способы нанесения микрорельефа разрабатываются для практической реализации достижений в области расчета (штамповка на торце галгенидного ИК-волновода [2]).

Актуальную иллюстрацию связи расчета и технологии представляет тенденция к миниатюризации оптических элементов. При уменьшении линейных размеров характеристических неоднородностей микрорельефа насущной необходимостью становится учет влияния технологических погрешностей его изготовления на формирование ожидаемой дифракционной картины. Так, в работах [3,4] обсуждается воздействие отклонений от расчетной глубины травления на характеристики дифракционных микролинз. Авторы [5] обращаются к исследованию влияния клина травления на формирование распределения интенсивности света за бинарной дифракционной решеткой с неограниченной апертурой.

В указанных публикациях моделирование распространения электромагнитного поля через оптический элемент производится в рамках скалярной теории света. Переход к микрорельефу с неоднородными неоднородностями обуславливает необходимость применения строгой электромагнитной теории, основанной на уравнениях электродинамики. Такой подход, характеризующийся разностным решением уравнений Максвелла, использовался при исследовании влияния технологических погрешностей изготовления на фокусировку излучения алмазными микролинзами [6,7]. Однако, рассматривались погрешности, свойственные исключительно абляции поликристаллической пластины эксимерным УФ-лазером – технологии, имеющей весьма ограниченное применение. К тому же, в рамках строгой теории дифракции моделировалось распространение излучения лишь через тело линзы, а для исследования поля в области фокусировки привлекался аппарат скалярной теории.

Настоящая работа, посвященная изучению влияния клина травления на фокусировку излучения ци-

линдрическими микролинзами с высокой числовой апертурой, свободна от указанных недостатков. В рассмотрение вводятся распространенные технологии химического и плазменно-химического травления; для моделирования процесса дифракции привлекается только строгая теория.

1. Выбор параметров вычислительных экспериментов

Моделирование дифракции электромагнитной волны на микролинзах основывается далее на разностном решении уравнений Максвелла [8], как на популярном инструменте исследования задач микрооптики. В качестве сеточных уравнений выбираются конечно-разностные представления Yee [9] для Н-волны; на оптические элементы и их окрестности налагается универсальная сеточная область [10] с объединенными поглощающими слоями; плоская однородная падающая волна задается по методике результирующего поля [11].

Изучению подлежат дифракционные оптические элементы (ДОЭ), рассчитанные квантованием фазовой функции цилиндрической рефракционной микролинзы с апертурой 16λ (где λ – длина волны падающего излучения), числовой апертурой $\sin \lambda/4$, радиусом кривизны 10λ и показателем преломления материала $n=2$ (например, для хлорида серебра при $\lambda=1$ мкм). Согласно геометрической оптике область фокусировки такой микролинзы расположена на расстоянии $f=8\lambda$ от правого полюса [12]. При построении ДОЭ производится разметка апертуры рефракционной линзы на 7 зон Френеля и квантование фазовой функции на две (бинарная микролинза) и четыре (четырёхуровневая микролинза) ступеньки, согласно принятым правилам [13]. Толщина (расстояние между полюсами) рефракционной линзы составляет 4λ , дифракционных - λ .

Технологии формирования ступенчатого микрорельефа химическим и плазменно-химическим травлением вносят искажения в расчетный профиль ДОЭ, традиционно называемые клином травления. Химическое травление характеризуется «внутренним» клином (рис. 1б), плазменно-химическое – «внешним» (рис. 2в). Примем параметр клина $\alpha=\pi/8$ (рис. 1 из [5]), как это допускается в [5].



Рис. 1. Ступенька бинарной линзы: а) без клина травления; б) с «внутренним» клином травления, характерным для жидкостного травления; в) с «внешним» клином травления, характерным для плазменно-химического.

Параметры вычислительного эксперимента (рис. 2) задаются следующими: $L_y=18\lambda$ (16λ на апертуру и 2λ на поглощающий по направлению Y слой); $L_z=18\lambda$ (падающая волна интенсивностью 1 Вт/м^2 определяется на отрезке $z=0$, $0 \leq y \leq L_y$, левый полюс линзы расположен на отметке $z_1=1,5\lambda$, поглощающий по направлению Z слой имеет толщину 2λ). Линзы обращены рельефами влево.

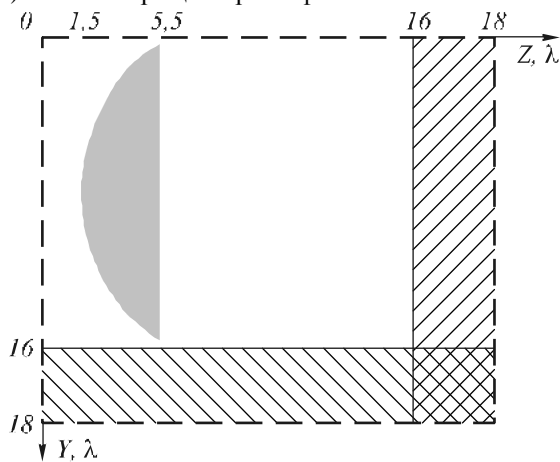


Рис.2. Область вычислительного эксперимента. Заштрихованы поглощающие слои.

Сеточная область налагается из расчета 50 узлов на длину волны по пространству; 100 узлов по времени на интервал, за который плоская электромагнитная волна в вакууме проходит расстояние в λ (скорость распространения c); время распространения $T=50\lambda/c$ считалось достаточным для предположения о монохроматичности поля в области вычислительного эксперимента.

2. Моделирование распространения излучения через микролинзы с клином травления.

В первой серии вычислительных экспериментов исследуются бинарная и четырехуровневая микролинзы с оптической поверхностью, лишенной клина травления. По рассчитанной дифракционной картине определяется эффективность ДОЭ и расстояние от правого полюса линзы до положения максимума интенсивности на главной оптической оси – f . Под эффективностью ДОЭ понимается величина γ , равная отношению максимальной интенсивности на главной оптической оси такого элемента к аналогичному параметру, характеризующему рефракционную микролинзу.

Анализируя результаты первой серии (табл. 1, рис.3) уместно говорить о значительном снижении эффективности при переходе к квантованному профилю ДОЭ.

Таблица 1 Результаты первой серии вычислительных экспериментов.

характеристики	микролинзы		
	рефракционная	бинарная	четырёхуровневая
$f(\lambda)$	6,46	7,98	4,6
γ	1,0	0,24	0,44

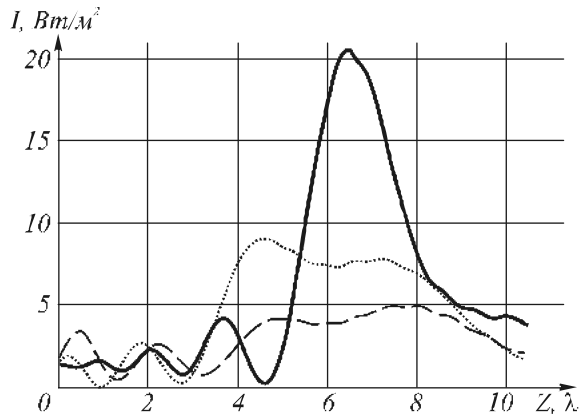


Рис.3. Распределение интенсивности электрического поля на главной оптической оси рефракционной (сплошная кривая), четырехуровневой (пунктирная кривая) и бинарной (штриховая линия) дифракционных микролинз без технологических неоднородностей профиля. Начало отсчета совпадает с правым полюсом рефракционной линзы.

Фокусное расстояние рефракционной линзы оказалось меньше теоретически рассчитанного на $1,54\lambda$, бинарной микролинзы на $0,02\lambda$, четырехуровневой – на $3,22\lambda$.

Вторая серия вычислительных экспериментов (рис.4) направлена на исследование бинарных дифракционных микролинз с неоднородностями микрорельефа, свойственными химическому (табл. 2, вторая колонка) и плазменно-химическому (табл. 2, третья колонка) травлению.

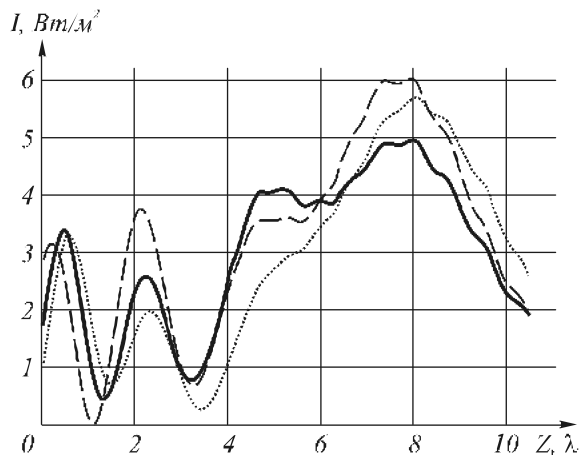


Рис.4. Распределение интенсивности электрического поля на главной оптической оси бинарной микролинзы без клина травления (сплошная кривая), с «внутренним» клином травления (штрих-пунктирная кривая) и с «внешним» клином травления (пунктирная линия).

Таблица 2. Результаты второй серии вычислительных экспериментов.

характеристики	бинарные микролинзы, изготовленные	
	химическим травлением	плазменно-химическим травлением
$f(\lambda)$	7,92	8,04
γ	0,29	0,28

В отличие от результатов экспериментов предыдущей серии (табл. 1, третья колонка) эффективности бинарных микролинз с технологическими погрешностями изготовления выросли на 5% для случая с «внутренним» клином травления и на 4% для случая с «внешним». Область фокусировки при этом не сместилась.

Заключительная серия экспериментов производилась для четырехуровневых микролинз (табл. 3, рис. 5).

Таблица 3. Результаты третьей серии вычислительных экспериментов.

характеристики	четырёхуровневые микролинзы, изготовленные	
	химическим травлением	плазменно-химическим травлением
$f(\lambda)$	5,16	4,78
γ	0,55	0,45

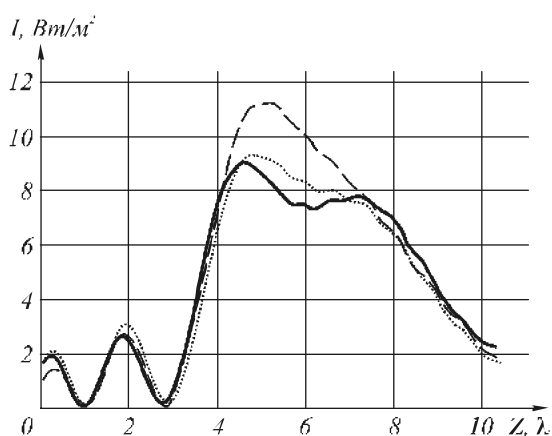


Рис.5. Распределение интенсивности электрического поля на главной оптической оси четырехуровневой микролинзы без клина травления (сплошная кривая), с «внутренним» клином травления (штрих-пунктирная кривая) и с «внешним» клином травления (пунктирная линия).

В рассматриваемом случае эффективности четырехуровневых микролинз с технологическими погрешностями изготовления выросли на 11% (для «внутреннего» клина травления) и на 1% (для «внешнего»). Область фокусировки при этом заметно сместилась (на $0,56\lambda$) лишь для линзы с «внутренним» клином травления.

Выводы

Характеризуя результаты вычислительных экспериментов в целом, необходимо отметить рост эффективности ДОО (до 11%) при учете клина травления. Очевидно, технологические неоднородности «сглаживают» профиль ДОО, приближая его к профилю полутонной линзы, уменьшая тем самым действие дефекта, связанного с квантованием фазовой функции. При этом область фокусировки дифракционных микролинз с внесением клина травления в большинстве случаев смещается незначительно.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» («BRHE», RVXO-014-SA-06), гранта Президента Российской Федерации МД-5303.2007.9, грантов РФФИ 07-02-12134 и 06-07-08074.

Литература

1. **Павельев В.С.** Применение замечательных свойств собственных подпространств оператора распространения света в линзоподобной среде для решения задач компьютерной оптики// Компьютерная оптика, 2002.- №24.- с. 58-61.
2. **Бородин С.А.** и др., Формирование и исследование дифракционного микрорельефа на торце галогенидного ИК волновода// Бородин С.А., Волков А.В., Казанский Н.Л., Карпеев С.В., Моисеев О.Ю., Павельев В.С., Якуненкова Д.М., Рунков Ю.А., Головашкин Д.Л. Компьютерная оптика, 2005.- №27.- с. 45-49.
3. **Волков А.В.**, Численное исследование дифракции света на дифракционных линзах// Волков А.В., Скиданов Р.В. Вестник СГТУ, 2000.- вып. 9.- с. 35-39.
4. **Скиданов Р.В.**, Влияние технологических ошибок и уширения линии излучения лазера на качество работы дифракционных оптических элементов// Скиданов Р.В., Хонина С.Н. Оптический журнал, 2004.- Том 71, № 7.- с.62-64.
5. **Досколович Л.Л.**, Расчет бинарных дифракционных решеток с клином травления// Досколович Л.Л., Тявин Е.В. Компьютерная оптика, 2005.- №27.- с. 17-20.
6. **Головашкин Д.Л.**, Моделирование прохождения ИК-излучения через алмазную дифракционную линзу с субволновыми технологическими погрешностями микрорельефа// Головашкин Д.Л., Дюпарре М., Павельев В.С., Соيفер В.А. Компьютерная оптика, 2001.- № 21.- с. 131-133.
7. **Головашкин Д.Л.** Анализ распространения излучения через фрагменты ДОО с технологическими погрешностями микрорельефа// Известия Сибирского РАН, 2002.- Том 4, № 1.- с. 68-72.
8. **Taflov A., Hagness S.** Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method: 2nd. ed. – Boston: Artech House Publishers, 2000.- 852 p.
9. **Yee K.S.** Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media// IEEE Trans. Antennas Propag., 1966.- AP-14.- p. 302-307.
10. **Головашкин Д.Л.** Постановка излучающего условия при моделировании работы цилиндрических дифракционных оптических элементов методом разностного решения уравнений Максвелла// Математическое моделирование, 2007.- Том 19, № 3. - с. 3-14.
11. **Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л.** Разностный метод решения уравнений Максвелла// Учеб. пособие/ Самар. гос. аэрокосм. ун.-т. Самара, 2007.-160с.
12. **Бутиков Е.И.** Оптика: Учебное пособие для студентов физических специальностей вузов.- СПб.: Невский Диалект, 2003.-480 с.
13. Методы компьютерной оптики (Издание второе, исправленное): под ред. Соифера В.А.- М. Физматлит, 2003.- 688с.

SIMULATION OF SIDEWALL-ANGLE EFFECTS ON RADIATION FOCUSING BY HIGH-NUMERICAL-APERTURE CYLINDRIC MICROLENSSES

D.L. Golovashkin¹, E.N. Kashaikina², Yu.O. Orekhova²

¹ Image Processing Systems Institute of the RAS,

² Samara State Aerospace University

Abstract

The paper is aimed at study of sidewall-angle effects on radiation focusing by diffractive microlenses with wavelength aperture 16 and numerical aperture 0.71. The sidewall-angle cases typical for liquid-chemical and plasma-chemical technologies are considered.

Keywords: diffractive microlens, wavelength aperture, numerical aperture, Finite-Difference Time-Domain method.

Acknowledgements: The work was supported within the framework of the Russian-American Basic Research and Higher Education Program (BRHE, RUX0-014-SA-06), by the grant of the President of the Russian Federation MD-5303.2007.9, and by the Russian Foundation for Basic Research grants Nos. 07-02-12134 and 06-07-08074.

Citation: Golovashkin DL, Kashaikina EN, Orekhova YuO. Simulation of sidewall-angle effects on radiation focusing by high-numerical-aperture cylindrical microlenses [In Russian]. Computer Optics 2008; 32(1): 47-49.

References

- [1] Pavelyev VS. Fundamental properties of eigensubspaces of the operator of light propagation in a lenslike medium for solving computer optics problems [In Russian]. Computer Optics 2002; 24: 58-61.
- [2] Borodin SA, Volkov AV, Kazanskiy NL, Karpeev SV, Moiseev OYu, Pavelyev VS, Yakunenkova DM, Runkov YuA, Golovashkin DL. Fabrication and characterization of a frontend diffractive microrelief in a halogenide IR waveguide [In Russian]. Computer Optics 2005; 27: 45-49.
- [3] Volkov AV, Skidanov RV. Diffraction of light by diffractive lenses: numerical investigation [In Russian]. Herald of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Science 2000; 9: 174-183.
- [4] Skidanov RV, Khonina SN. How processing errors and broadening of the emission line of a laser affect the operating quality of diffractive optical elements. Journal of Optical Technology 2004; 71(7): 469-471.
- [5] Doskolovich LL, Tyavin YeV. Designing binary diffraction gratings with etching wedge areas [In Russian]. Computer Optics 2005; 27: 17-20.
- [6] Golovashkin DL, Duparre M, Pavelyev VS, Soifer VA. Simulation of IR radiation passing through a diamond diffractive lens with microrelief subwavelength processing errors [In Russian]. Computer Optics 2001; 21: 131-133.
- [7] Golovashkin DL. Analysis of radiation propagation through DOE fragments with microrelief technological errors [In Russian]. Proceedings of Samara Scientific Center of the RAS 2002; 4(1): 68-72.
- [8] Taflove A, Hagness S. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method: 2nd. ed. - Boston: Artech House Publishers 2000; 852 p.
- [9] Yee KS. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. IEEE Trans Antennas Propag 1966; AP-14: 302-307.
- [10] Golovashkin DL. Formulation of the radiation condition for modeling the cylindrical doe operation using a finite difference solution of Maxwell's equations [In Russian]. Mathematical Modeling 2007; 19(3): 3-14.
- [11] Golovashkin DL, Kazanskiy NL. Method of differential solution of Maxwell's equations [In Russian]. Handbook. Samara State Aerospace University 2007; 160 p.
- [12] Butikov Yel. Optics: Handbook for university-level students in physics [In Russian]. St. Petersburg: "Nevsky Dialect" Publisher 2003; 480 p.
- [13] Methods of Computer Optics / 2nd ed. (rev.) by V.A. Soifer [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher 2003; 688 p.