

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ БИНАРНОЙ СЕКАНСНОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ ВИДИМОГО СВЕТА

Налимов А.Г.

Институт систем обработки изображений РАН

### Аннотация

В работе проведено 3D моделирование фокусировки линейно-поляризованного света планарной бинарной цилиндрической линзой, аналогичной градиентной линзе Микаэляна, для видимого света с длиной волны  $\lambda = 0,532$  нм. Показатель преломления материала линзы  $n = 1,56$ . Минимальный диаметр фокусного пятна на выходе линзы был равен по полуспаду интенсивности света  $0,37$  от длины волны. Эффективность фокусировки света при этом равна  $41\%$ . Моделирование проводилось FDTD-методом с помощью коммерческой программы FullWave фирмы RSoft.

**Ключевые слова:** градиентная бинарная линза, фотонный кристалл, планарный волновод, цилиндрическая линза.

### Введение

Актуальной задачей является уменьшение диаметра фокусного пятна фокусирующей системы. Например, в работах [1–2] использовались бинарные и полутоновые дифракционные элементы, дополняющие основной объектив. В этих работах использовался радиально-поляризованный свет. При моделировании в [3] достигнута фокусировка света в пятно шириной  $0,4\lambda$ . Для этого использовалась градиентная 3D линза Микаэляна, фокусирующая радиально-поляризованный свет, максимальный показатель преломления в центре линзы  $n = 1,5$ . Моделирование проводилось с помощью FDTD метода. В [4] было получено изображение точечного источника света с помощью градиентной 2D микролинзы Микаэляна с максимальным показателем преломления в центре линзы  $n = 3,47$  (кремний) для длины волны света  $\lambda = 1,55$  мкм. Ширина максимума интенсивности по полуспаду составила  $\text{FWHM} = 0,12\lambda$ . А в [5] с помощью дифракционного элемента с числовой апертурой  $\text{NA} = 0,95$  удалось сфокусировать радиально-поляризованный свет в пятно шириной всего  $\text{FWHM} = 0,7\lambda$ . Как видно из приведенных работ, наилучшая фокусировка света  $\text{FWHM} = 0,12\lambda$  достигнута при использовании 2D градиентной линзы с максимальным показателем преломления в центре  $n = 3,47$ , что соответствует кремнию. Для показателя преломления в центре линзы  $n = 1,5$  достигнута фокусировка не лучше  $0,4\lambda$ . Кремний пропускает длины волн от  $1,2$  мкм до  $7$  мкм, при этом при прохождении светом  $10$  мм в кремнии наблюдается его затухание вдвое [6], что делает его удобным для изготовления оптики для телекоммуникационной длины волны света ( $\lambda = 1,55$  мкм) и практически невозможным его использование для линз, работающих в видимой области спектра. Однако для изучения свойств градиентных линз удобно использовать лазерное излучение с длиной волны  $\lambda = 532$  нм. Эта длина волны соответствует зеленому полупроводниковому лазеру, а так же твердотельному лазеру на неодимовом стекле (с

двукратным умножением основной частоты). У этих лазеров высокий КПД и видимое глазом и CCD камерами излучение, они широко распространены и относительно дешевы.

В данной работе проведено 3D моделирование фокусировки ТЕ-поляризованного света планарной бинарной микролинзой или фотонно-кристаллической (ФК) линзой, аналогичной градиентной линзе Микаэляна для длины волны света  $\lambda = 0,532$  нм. Предполагается, что линза выполнена в пленке электронного резиста, имеющего показатель преломления  $n = 1,56$ , нанесенного на подложку из плавленного кварца ( $n_0 = 1,46$ ).

### Моделирование в трехмерном случае

Трехмерная оптическая схема и внешний вид линзы с волноводом изображены на рис. 1. Ось  $Z$  проходит через оптическую ось системы – по центру планарного волновода (хотя на рис. 1 она нарисована сбоку).

Моделирование распространения света через линзу вначале было проведено в 2D случае. Для получения острой фокусировки света на границе ФК линзы ее ширина была выбрана  $W_L = 2,55$  мкм, длина  $H_L = 1,83$  мкм. При таких параметрах в двумерном случае ширина фокусного пятна по полуспаду интенсивности составила  $\text{FWHM} = 0,361\lambda$ . Расположение и диаметр отверстий в ФК были рассчитаны для данных параметров ширины и высоты линзы, после чего была проведена оптимизация величин  $W_L$  и  $H_L$  с целью уменьшения фокусного пятна. При изменении ширины  $W_L$  и высоты  $H_L$  линзы координаты центров отверстий сдвигались пропорционально, но их диаметры оставались неизменными. В ходе оптимизации были найдены новые параметры  $W_L = 2,652$  мкм,  $H_L = 1,39$  мкм, при этом ширина фокусного пятна равна  $\text{FWHM} = 0,28\lambda$ . Эффективность фокусировки при этом составила  $39,8\%$ .

Моделирование трехмерной оптической схемы проводилось при следующих параметрах: радиус распространяющегося в волноводе гауссова пучка  $\sigma = 2,75$  мкм, длина волновода между источником и линзой  $L = 6$  мкм, ширина волновода  $W = 5,5$  мкм,

интервал разбиения сетки отсчетов по всем трем координатам равен  $\lambda/20$ . Размеры линзы были взяты оптимальные.

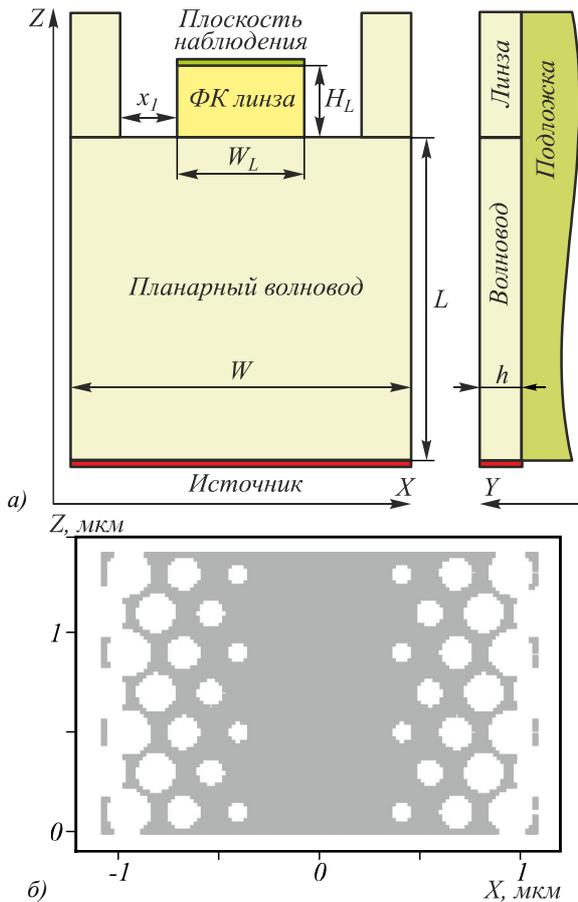


Рис. 1. Трехмерная оптическая схема планарной ФК линзы на подложке из плавленного кварца (а), двумерное распределение показателя преломления в линзе, серый цвет – материал (б)

Моделирование показало, что чем меньше толщина волновода  $h$ , тем шире фокусное пятно вдоль оси  $X$ . С другой стороны, чем меньше толщина волновода  $h$ , тем меньше доля света, распространяющаяся в пленке волновода в виде моды. С уменьшением толщины волновода  $h$  менее  $0,75$  мкм интенсивность света в фокусе линзы падает, что свидетельствует о потере света, уходящего в подложку. Однако, с увеличением толщины волновода увеличивается соотношение глубины травления к диаметру отверстий, составляющих фотонный кристалл (аспектное отношение), что усложняет изготовление ФК линзы средствами электронной литографии. Оптимальное значение высоты  $h = 0,6$  мкм, оптимальное расстояние  $x_1 = 0,11$  мкм. При этом достигается минимальное фокусное пятно  $\text{FWHM} = 0,365\lambda$  и максимальная интенсивность в фокусе. Эффективность фокусировки по полуспаду интенсивности при этом равна 41%. При другой толщине волновода  $h$  меняется только интенсивность в фокусном пятне, оптимальное расстояние  $x_1$  остается постоянным.

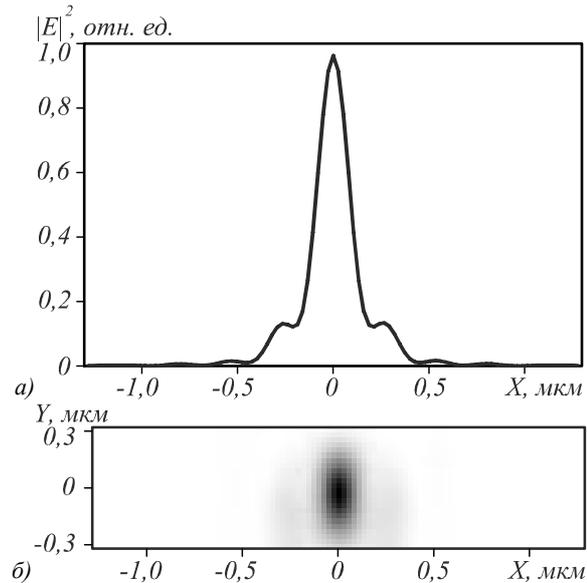


Рис. 2. Распределение интенсивности  $|E|^2$  за линзой по линии вдоль оси  $X$  (а) через максимум интенсивности (по центру волновода) с ФК линзой; двумерное распределение интенсивности  $|E|^2$  в плоскости наблюдения, негатив (б)

На рис. 2 показана форма фокусного пятна за линзой при оптимальных параметрах:  $x_1 = 0,11$  мкм,  $h = 0,6$  мкм.

В трехмерном случае боковые лепестки проявляются слабее и напоминают «пьедестал» (15%), в отличие от двумерного случая (30%), как в случае плоской падающей волны на линзу, так и в случае гауссова распределения. Ширина фокусного пятна вдоль оси  $X$  равна  $\text{FWHM} = 0,365\lambda$ . Поскольку линза планарная, вдоль оси  $Y$  фокус не наблюдается, ширина по полуспаду интенсивности вдоль оси  $Y$   $\text{FWHM} = 0,74\lambda$ .

### Заключение

Рассчитана цилиндрическая планарная бинарная линза, аналог градиентной линзы Микаэляна [3,4], шириной  $W_L = 2,652$  мкм, длиной  $H_L = 1,39$  мкм, выполненной в виде фотонного кристалла в пленке резиста с показателем преломления  $n_1 = 1,56$  на подложке из плавленного кварца с показателем преломления  $n_0 = 1,46$ , которая фокусирует свет с ТЕ-поляризацией,  $\lambda = 532$  нм на своей границе с шириной по полуспаду интенсивности вдоль оси, поперечной волноводу,  $\text{FWHM} = 0,28\lambda$  в двумерном случае, и  $\text{FWHM} = 0,365\lambda$  в трехмерном случае; эффективность фокусировки света в трехмерном случае равна 41%. Этот диаметр меньше, чем было получено для 3D цилиндрической линзы Микаэляна в [6].

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 14.740.11.0016), грантов Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-4128.2012.9) и молодого кандидата наук (МК-3912.2012.2), а также гранта РФФИ № 12-07-00269.

*Литература*

1. **Kitamura, K.** Sub-wavelength focal spot with long depth of focus generated by radially polarized, narrow-width annular beam / K. Kitamura, K. Sakai, S. Noda // *Opt. Express*. – 2010. – V. 18, N 5. – P. 4518-4525.
2. **Yuan, G.H.** Nondiffracting transversally polarized beam / G.H. Yuan, S.B. Wei, X. Yuan // *Opt. Lett.* – 2011. – V. 36, N 17. – P. 3479-3481.
3. **Kotlyar, V.V.** Sharply focusing a radially polarized laser beam using a gradient Mikaelian's microlens / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev // *Optics Comm.* – 2008. – V. 282. – P. 459-464.
4. **Котляр, В.В.** Градиентные элементы микрооптики для достижения сверхразрешения / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв, А.Г. Налимов // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33, N 4. – С. 369-378.
5. **Tan, Q.** Diffractive superresolution elements for radially polarized light / Q. Tan, K. Cheng, Z. Zhou, G. Jin // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2010. – V. 27, N 6. – P. 1355-1360.
6. <http://www.fluoride.su/Silicon.html>

*References*

1. **Kitamura, K.** Sub-wavelength focal spot with long depth of focus generated by radially polarized, narrow-width annular beam / K. Kitamura, K. Sakai, S. Noda // *Opt. Express*. – 2010. – V. 18, N 5. – P. 4518-4525.
2. **Yuan, G.H.** Nondiffracting transversally polarized beam / G.H. Yuan, S.B. Wei, X. Yuan // *Opt. Lett.* – 2011. – V. 36, N 17. – P. 3479-3481.
3. **Kotlyar, V.V.** Sharply focusing a radially polarized laser beam using a gradient Mikaelian's microlens / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev // *Optics Comm.* – 2008. – V. 282. – P. 459-464.
4. **Kotlyar, V.V.** Gradient microoptics elements for superresolution achieving / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.G. Nalimov // *Computer optics*. – 2009. – V. 33, N 4. – P. 369-378. – (In Russian).
5. **Tan, Q.** Diffractive superresolution elements for radially polarized light / Q. Tan, K. Cheng, Z. Zhou, G. Jin // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2010. – V. 27, N 6. – P. 1355-1360.
6. <http://www.fluoride.su/Silicon.html>

**PLANAR BINAR LENSE PARAMETERS OPTIMISATION FOR VISIBLE LIGHT***A.G. Nalimov**Image processing systems institute of the RAS**Annotation*

A modeling of the focusing of linear-polarized light by a binar cylindrical lens, analog of gradient Mikaelian lens was carried out for a visible light with a wavelength of  $\lambda = 0,532$  nm. The refraction number of the lens is  $n = 1,56$ , which corresponds to electronic resist. The minimum focus spot diameter at the end side of the lens was calculated full width half maximum as 0,37 of the wavelength. Efficiency of the focusing is equal to 41%. Modeling was carried out in by FDTD-method in the commercial program FullWave, Rsoft design group.

*Key Words:* gradient binar lens, photonic crystal, planar waveguide, cylindrical lens.

*Сведения об авторе*

**Налимов Антон Геннадьевич**, 1980 года рождения, закончил Самарский государственный аэрокосмический университет в феврале 2003 года по специальности «физик». Работает на кафедре технической кибернетики СГАУ в должности доцента, в Институте систем обработки изображений РАН в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук (2006), соавтор 58 работ.

E-mail: [anton@smr.ru](mailto:anton@smr.ru).

**Anton Gennadyevich Nalimov** (b. 1980), finished Samara state aerospace university in February, 2003. Nalimov A.G. works on technical cybernetics department in SSAU as an associate professor, works as a scientist in Image processing systems institute of the Russian Academy of Sciences. Candidate in physics and mathematics (2006), coauthor of 58 papers.