

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ СВЕТА ГРАДИЕНТНОЙ И БИНАРНОЙ МИРОЛИНЗАМИ

А.Г. Налимов<sup>1</sup>, В.В. Котляр<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

<sup>1,2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

В работе проведено моделирование фокусировки света планарной градиентной микролинзой. В случае, когда вектор электрического поля направлен поперек оптической оси вдоль подложки, получена острая фокусировка света в узкую полосу шириной  $\lambda/38$  и длиной  $\lambda/5,5$ . Эффективность фокусировки при этом составила 22%. Такую линзу можно выполнить в виде фотонного кристалла. Эффективность фокусировки в таком случае получается 30,2% против 22,7% для градиентной линзы при аналогичных параметрах моделирования.

**Ключевые слова:** планарная линза, фотонный кристалл, острая фокусировка.

## Введение

Острая фокусировка света и преодоление дифракционного предела широко обсуждаются по сей день. Линзы и оптические элементы, имеющие возможность сфокусировать лазерный пучок в узкое пятно соразмерное или менее длины волны света, могут использоваться в задачах микроскопии, сопряжения волноводов, телекоммуникации, литографии, обработки материалов и т.д. Например, в [1-3] при моделировании было получено фокусное пятно с диаметром  $\lambda/2$ - $\lambda/4$ . Узкая локализация света может наблюдаться при распространении пучка в средах с анизотропией, например, состоящих из набора диэлектрических и металлических слоев [4] или массива металлических проводников в диэлектрике [5]. В работе [5] получена локализация света в волноводной структуре шириной по полуспаду интенсивности  $\text{FWHM}=\lambda/9$ , а в [4] авторы получили очень острую локализацию света в продольной структуре с шириной по полуспаду интенсивности  $\text{FWHM}=\lambda/152$  и  $\text{FWHM}=\lambda/268$  по поперечным координатам. Однако для получения такой среды период чередования металлических ( $\epsilon = -12,9$ ) и диэлектрических ( $\epsilon = 13,9$ ) слоев составил 13,2 нм. Такую среду сложно изготовить, кроме того, узкая локализация света остается внутри среды. В [6] показана возможность локализовать свет на поверхности нано-шара из металла или диэлектрика, находящегося на острие аксикона, в пятно с шириной  $\text{FWHM}=\lambda/400$ . Однако такую конструкцию тоже сложно изготовить. Эффективность такой фокусировки авторы оценивают в 0,5%, что может усложнить попытку экспериментально подтвердить результаты работы.

Известно, что щель, ширина которой имеет порядок десятков нанометров, может служить для локализации и распространения в ней света, как в волноводе [7-9]. В двумерном случае было показано, что расположение щели в материале линзы в области фокусного пятна помогает значительно увеличить интенсивность света и уменьшить ширину фокуса. Так, в [9] в случае ТМ-поляризации получено фокусное пятно шириной  $\text{FWHM}=\lambda/28$  и эффективностью 43%. Однако возможность фокусировки света трехмерной планарной микролинзой и влияние её толщины на возможность острой фокусировки света подобным образом не были исследованы. Перспективность такого

способа острой фокусировки обуславливается возможностью локализации света с высокой интенсивностью на границе линзы, где узкое фокусное пятно может быть доступно для различных применений. Об этом и пойдет речь в данной работе.

## Моделирование

Свет распространяется в волноводе высотой  $H$  и шириной  $W$ , нанесенным на подложку из стекла. Показатель преломления подложки  $n=1,5$ , волновод выполнен в кремнии, его показатель преломления  $n_0=3,47$ . Волновод оканчивается градиентной линзой длиной  $L$ , высота и ширина линзы равны таковым у волновода. Линза фокусирует свет на своей границе (рис. 1).

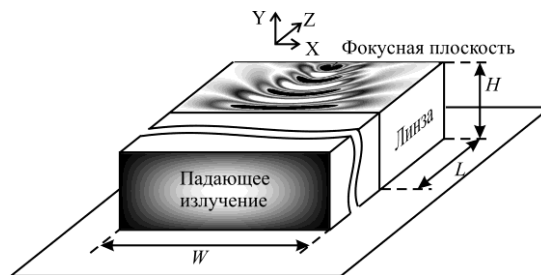


Рис. 1. Схема рассматриваемой задачи

Градиентный показатель преломления линзы рассчитывался по формуле Микаэляна [10]:

$$n(x) = n_0 \frac{1}{ch\left(\frac{\pi x}{2L}\right)} \quad (1)$$

Высота волновода и линзы  $H=0,8$  мкм была выбрана исходя из возможности изготовления методами электронной литографии. Ширина линзы была принята  $W=4,8$  мкм для удобства сравнения с результатами предыдущей работы [9], длина линзы  $L=2$  мкм. Длина волны света  $\lambda=1,55$  мкм соответствует наиболее часто используемой длине волны в задачах телекоммуникации. Для наилучшего приближения результатов моделирования к возможному эксперименту световая мода, распространяющаяся в волноводе до линзы, рассчитывалась в программном пакете FIMMWAVE (Photon Design).

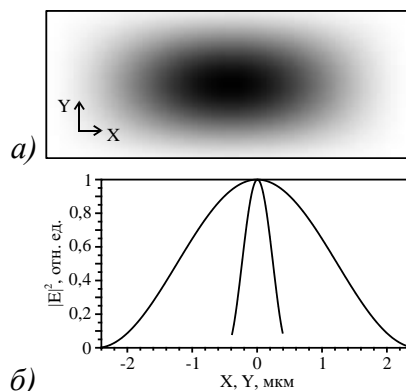


Рис. 2. Распределение интенсивности света  $|E|^2$ , распространяющегося в волноводе до линзы, в плоскости XY (а, негатив), и его сечения вдоль осей X и Y (б)

На рис. 2 представлен результат её расчета для линейно поляризованного света с направлением электрического вектора вдоль оси X. Точка с координатами  $X=Y=0$  на

изображении совпадает с центром волновода. Как видно из рис. 2, при столь значительном различии между показателями преломления волновода и подложки сечение интенсивности света через центр волновода вдоль оси  $Y$  получилось практически симметричным относительно центра координат  $X=Y=0$ . Ширина падающего пучка при толщине волновода  $H=0,8$  мкм равна  $FWHM_x=2,13\lambda$ ,  $FWHM_y=0,414\lambda$ . Прохождение света через линзу моделировалось методом FDTD, реализованном в программном пакете FullWAVE (RSoft Design). Наименьшая ширина фокусного пятна при этом получается при падающей волне  $E_y=1$ ,  $E_x=E_z=0$ , его ширина по полуспаду интенсивности равна  $FWHM_x=0,254\lambda$  вдоль оси  $X$ ,  $FWHM_y=0,19\lambda$  вдоль оси  $Y$ . При падающей волне  $E_x=1$ ,  $E_y=E_z=0$  ширина фокусного пятна по полуспаду интенсивности равна  $FWHM_x=0,268\lambda$  вдоль оси  $X$ ,  $FWHM_y=0,15\lambda$  вдоль оси  $Y$ .

Рассмотрим особенности фокусировки света при наличии щели на оптической оси линзы. Расположение щели и её размеры представлены на рис. 3. Глубину щели выберем равной  $W_3=H$ .

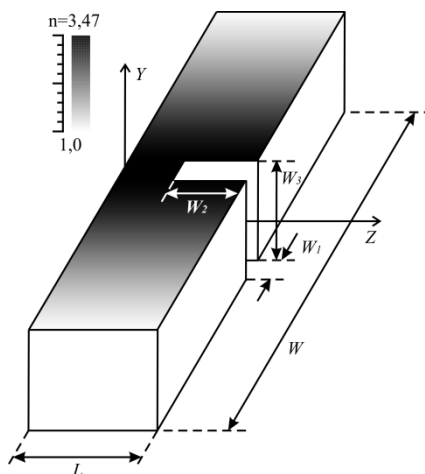


Рис. 3. Схема линзы со щелью на оптической оси

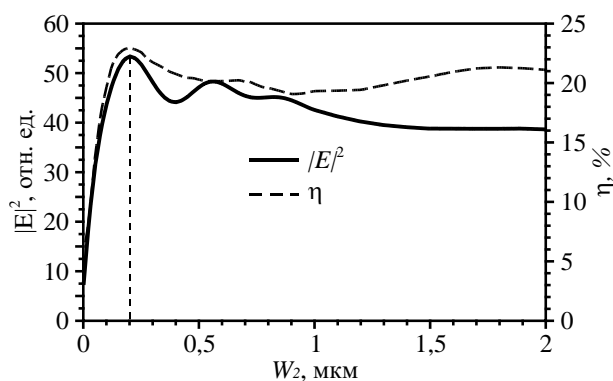
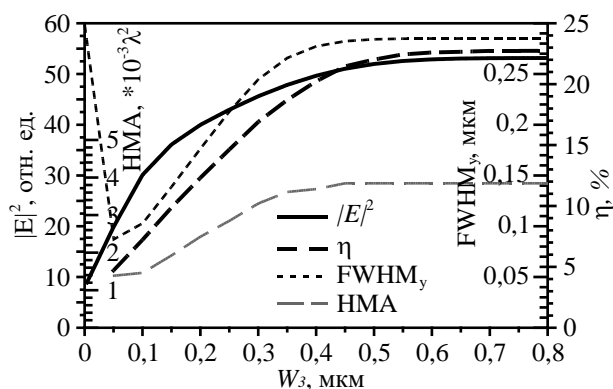


Рис. 4. Зависимость энергетических характеристик фокусировки от длины щели  $W_2$  при ширине щели  $W_1=30$  нм

Изменяя длину щели, можно найти такую длину, при которой интенсивность излучения и эффективность фокусировки света станут максимальными. На рис. 4 показаны зависимости эффективности фокусировки и интенсивности на оптической оси от длины щели  $W_2$ . За эффективность фокусировки  $\eta$  принято отношение энергии внутри фокусного пятна (до первых минимумов) ко всей энергии, пришедшей в выходную плоскость линзы. Видно, что увеличить интенсивность в центре фокусного пятна на 37%

можно путем уменьшения длины щели до 200 нм, при этом эффективность фокусировки света также немного увеличивается и достигает  $\eta=22,7\%$ . То есть прибавка в интенсивности на оптической оси по сравнению с вариантом линзы без щели составляет приблизительно 6,5 раз. На рис. 5 представлена зависимость интенсивности от глубины щели  $W_3$ , при этом ширина и длина щели были зафиксированы на значениях  $W_1=30$  нм,  $W_2=200$  нм. Щель глубиной  $W_3 < H$  размещалась в центре линзы, не достигая своими краями плоскостей линзы, граничащих с воздухом и подложкой.



**Рис. 5.** Зависимость энергетических характеристик фокусировки от глубины щели  $W_3$  при ширине щели  $W_1=30$  нм и длине щели  $W_2=200$  нм. На графике представлены интенсивность  $|E|^2$  в центре фокусного пятна на оптической оси, эффективность фокусировки света  $\eta$ , ширина фокусного пятна вдоль оси Y  $FWHM_y$ , площадь фокусного пятна НМА, приведенная в  $\lambda^2$ , где  $\lambda$  - длина волны света

Уменьшение глубины щели  $W_3$  происходило таким образом, что центр щели оставался в центре линзы (на оптической оси,  $X=Y=0$ ). Как показало моделирование, уменьшение этого параметра не приводит к дальнейшему росту интенсивности или эффективности фокусировки. При этом, с уменьшением  $W_3$  наблюдается уменьшение фокусного пятна вдоль оси Y начиная с  $W_3=0,4$  мкм и менее. Уменьшение глубины щели  $W_3$  также влечет уменьшение площади фокусного пятна, измеренное по половинному уровню (half maximum area - НМА). Для волновода толщиной 0,8 мкм оно составляет  $НМА=3,8 \cdot 10^{-3} \lambda^2$ . При уменьшении глубины щели до  $W_3=0,05$  мкм значение площади фокусного пятна падает до значения  $НМА=1,3 \cdot 10^{-3} \lambda^2$ . В отсутствие щели  $НМА=0,062 \lambda^2$ , что близко к значениям для острой фокусировки света аксиконом в свободном пространстве [11]. Полученные результаты дают представление о наилучших параметрах для наиболее эффективной фокусировки света линзой Микаэляна со щелью для получения минимального фокусного пятна, наибольшей эффективности и плотности энергии в фокусе линзы:  $H=0,8$  мкм,  $W_2=200$  нм,  $W_1=30$  нм,  $W_3=H$ .

Поскольку градиентные линзы сложно изготовить, целесообразно градиентный профиль показателя преломления аппроксимировать ступенчатым бинарным профилем, например, в виде фотонно-кристаллической линзы. На рис. 6 представлен профиль показателя преломления линзы в плоскости XZ, аналогичной той, результат которой рассматривался на рис. 4.

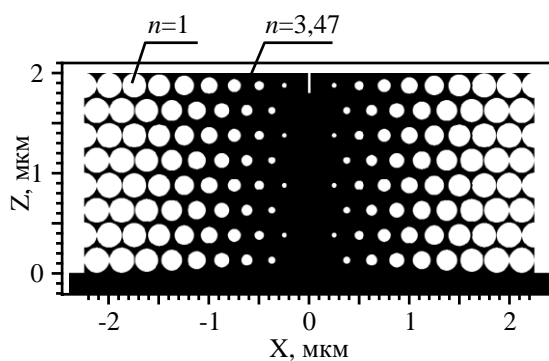


Рис. 6. Профиль показатель преломления фотонно-кристаллической линзы

Линза состоит из волновода с тем же материалом, показатель преломления которого  $n=3,47$ , и отверстий в нем с показателем преломления  $n=1$ . Моделирование показало, что при наличии щели зависимость ширины фокусного пятна вдоль оси  $X$  сохраняется такой же, как и для градиентной линзы, то есть ширина FWHM фокусного пятна шире  $W_1$  на 15-20%. Сохранился также и характер зависимости интенсивности фокусного пятна относительно длины щели: при аналогичных параметрах моделирования наибольшая интенсивность получается при длине щели в диапазоне  $W_2=180...200$  нм. Однако, с ростом количества рядов отверстий вдоль оси  $Z$  увеличивается интенсивность в фокусе линзы при отсутствии щели. Это способствует росту интенсивности при наличии щели оптимальной длины  $W_2=200$  нм, однако, не пропорционально. Например, моделирование показало, что максимальная интенсивность по центру линзы при 6 рядах отверстий вдоль оси  $Z$  (максимальный диаметр отверстия 333 нм) при отсутствии щели составляет  $I_{\max}=1,78$  отн. ед., в то время как при 8 рядах отверстий (максимальный диаметр отверстия 250 нм, см. рис. 6) максимальная интенсивность возросла до  $I_{\max}=2,9$  отн. ед. Минимальный диаметр отверстия в обеих линзах был ограничен в 30 нм. Максимальная интенсивность, полученная в результатах моделирования фокусировки света этими линзами при наличии щели на оптической оси с параметрами  $W_1=30$  нм,  $W_2=200$  нм  $W_3=N$  составила 15,3 и 18,8 отн. ед. соответственно. Оптимальная длина щели в 200 нм для фотонно-кристаллического аналога градиентной линзы Микаэляна является наилучшей и для эффективности фокусировки света. Так, для линзы, изображенной на рис. 6, эффективность, измеренная до первых минимумов вокруг фокусного пятна, составила  $\eta=30,2\%$ , что выше максимального полученного значения 22,7% для градиентной линзы.

## Заключение

В работе численно показана возможность фокусировки света планарной градиентной микролинзой в узкое пятно площадью  $NMA=3,8 \cdot 10^{-3} \lambda^2$  и минимальной шириной  $FWHM=0,026\lambda$  ( $\lambda/38$ ). Эффективность фокусировки света до первых минимумов составила 22,7%. Ширина фокусного пятна определяется шириной щели на оптической оси линзы. Уменьшая ширину щели до 10 нм, можно добиться уменьшения ширины фокусного пятна вплоть до  $FWHM = 0,027$  мкм ( $\lambda/59$ ), эффективность при этом упадет до  $\eta=15\%$ . Чтобы упростить изготовление линзы её можно представить в виде фотонного кристалла - массива отверстий в кремнии диаметром от 30 до 250 нм. В этом случае при

ширине щели 30 нм и соответственно ширине фокусного пятна в поперечной плоскости  $0,026\lambda$  эффективность фокусировки света составит  $\eta=30,2\%$ .

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-9498.2016.9), а также грантов РФФИ 14-29-07133, 15-07-01174, 15-37-20723, и 15-47-02492.

## Литература

1. Yoon, J. Subwavelength focusing of light from a metallic slit surrounded by grooves with chirped period / J. Yoon, K. Choi, S.H. Song, G. Lee // *J. Opt. Soc. of Korea*. – 2005. - Vol. 9(4). – P. 162-168.
2. Mote, R.G. Near-field focusing properties of zone plates in visible regime – New insights / R.G. Mote, S.F. Yu, B.K. Ng, W. Zhou, S.P. Lau // *Opt. Express*. – 2008. – Vol. 16(13). – P. 9554-9564. – doi: 10.1364/OE.16.009554.
3. Huang, K. Realization of a subwavelength focused spot without a longitudinal field component in a solid immersion lens-based system / K. Huang, Y. Li // *Opt. Letters*. – 2011. – Vol. 36(18). – P. 3536-3538. – doi: 10.1364/OL.36.003536.
4. Miret, J.J. Diffraction-free propagation of subwavelength light beams in layered media / J.J. Miret and C.J. Zapata-Rodriguez // *J. Opt. Soc. Am. B*. – 2010. – Vol. 27(7). – P. 1435-1445. – doi: 10.1364/JOSAB.27.001435.
5. Zapata-Rodriguez, C.J. Subwavelength Bessel beams in wire media / J.J. Miret and C.J. Zapata-Rodriguez // *J. Opt. Soc. Am. B*. – 2014. – Vol. 31(1). – P. 135-143. – doi: 10.1364/JOSAB.31.000135.
6. Дегтярев, С.А. Нанофокусировка с помощью заостренных структур / С.А. Дегтярев, А.В. Устинов, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 629-637.
7. Almeida, V.R. Guiding and confining light in void nanostructure / V.R. Almeida, Q. Xu; C.A. Barrios, M. Lipson // *Opt. Letters*. – 2004. – Vol. 29 (11). – P. 1209-1211. – doi: 10.1364/OL.29.001209.
8. Котляр, В.В. Субволновая локализация света в волноводных структурах / В.В. Котляр, А.А. Ковалев, Я.О. Шулюпова, А.Г. Налимов, В.А. Сойфер // *Компьютерная оптика*, 2010. – Т. 34, № 2. – С. 169-186.
9. Kotlyar, V.V. Hyperbolic secant slit lens for subwavelength focusing of light / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov // *Opt. Letters*. – 2013. – Vol. 38 (15). – P. 2702-2704. – doi: 10.1364/OL.38.002702.
10. Kotlyar, V.V. High resolution through graded-index microoptics / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.G. Nalimov, S.S. Stafeev // *Advances in Optical Technologies*. – 2012. - Vol. 2012. – P. 1-9. – doi: 10.1155/2012/647165.
11. Khonina, S.N. Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2010. – Vol. 27(10). – P. 2188-2197. – doi: 10.1364/JOSAA.27.002188.