

## ГИПЕРБОЛИЧЕСКАЯ СЕКАНСНАЯ ЛИНЗА СО ЩЕЛЮЮ ДЛЯ СУБВОЛНОВОЙ ФОКУСИРОВКИ СВЕТА

Налимов А.Г., Котляр В.В.

Институт систем обработки изображений РАН

### Аннотация

Моделирование FDTD-методом показало, что бинарная фотонно-кристаллическая гиперболическая секансная микролинза в кремнии ( $n_0 = 3,47$ ) размером  $2 \times 5$  мкм со щелью шириной 50 нм и длиной 250 нм фокусирует ТМ-поляризованную плоскую волну в фокусное пятно вблизи поверхности с шириной  $\lambda/23$  и дифракционной эффективностью 44% и интенсивность в фокусе в 50 раз превышает интенсивность падающего света.

**Ключевые слова:** сверхразрешение, щель, планарный волновод, градиентная линза, линза Микаэляна, субволновая фокусировка.

### Введение

Оптические микролинзы играют важную роль в миниатюризации современных устройств нанопотоники. Они часто используются в лазерных излучателях, приёмниках оптических сигналов, в микроскопии, сопряжении волноводов и т. д. Достижение сверхразрешения в устройствах нанопотоники помогает ещё более уменьшить размеры оптических устройств, достичь новых возможностей как в обработке, так и в передаче информации. При этом важны как достижимая острота фокусировки излучения, так и её энергетическая эффективность. Например, в [1–3] при моделировании было получено фокусное пятно с диаметром  $\lambda/2$ – $\lambda/4$ . В [1, 2] для острой фокусировки света использовали дифракционную линзу с относительно большим фокусным расстоянием, в связи с чем диаметр фокусного пятна по полуспаду интенсивности (FWHM) был равен  $\lambda/2$ . Для увеличения числовой апертуры и уменьшения фокусного пятна широко применяют иммерсионные линзы [3]. С помощью них авторы в [3] достигли ширины фокусного пятна  $\text{FWHM} = \lambda/4$  при показателе преломления линзы  $n = 2$  и числовой апертуре  $\text{NA} = 1,7$ . А при использовании метаматериалов и иммерсионной оптики [4] возможно достичь эффективной числовой апертуры  $\text{NA} = 4,5$  и фокусного пятна с диаметром  $\text{FWHM} = \lambda/9$  при фокусировке света в материале линзы. Однако такое узкое фокусное пятно остаётся внутри линзы. Уменьшению фокусного пятна способствует фокусировка радиально или азимутально поляризованного света [5, 6]. Например, в [6] получена фокусировка света в фокусное пятно  $\text{FWHM} = \lambda/3$  в воздухе. Одним из способов преодоления дифракционного предела является фокусировка света с помощью плазмонов на периодических структурах [7, 8]. Таким образом можно получить острую фокусировку света, периодически повторяющуюся в пространстве. Широко используются для фокусировки света нанощели [9, 10]. Например, в [9] получена локализация в пятно шириной около  $\lambda/2$  света, выходящего из «субволнового генератора» – двух щелей шириной 80 нм каждая. А в [10] рассматриваются линзы, состоящие из щелей нанометрового размера в золоте. Свет, проходя через щели шириной 20 нм, фокусируется в область около половины длины волны. Числовая апертура щелевой линзы составляет при этом  $\text{NA} = 0,75$ . В [11] рассмотрена локализация в

метаматериале света, выходящего из двух и более щелей. Свет, выходящий из щелей в экране шириной 20 нм, интерферирует в метаматериале, состоящем из плёнок Ag и SiC, и на границах расходящихся световых потоков от каждой щели образуется световое пятно шириной  $\text{FWHM} = 22$  нм, или  $\lambda/17$ . Эффективность такой локализации света авторы не указывают, предположительно, она должна быть невелика, так как только края световых потоков участвуют в формировании узкого светового пятна. Также не указано, как можно вывести такое острое фокусное пятно из метаматериала. Интересно, что щель, ширина которой имеет порядок десятков нанометров, может служить для локализации и распространения в ней света, как в волноводе [12, 13]. Широко распространены градиентные линзы для острой фокусировки света, в частности, планарные фотонно-кристаллические линзы [14, 15]. В [16] фокусировка в область приблизительно  $\lambda/4$  осуществляется массивом отверстий в тейпере, что позволяет сопрягать два планарных волновода. В [17, 18] рассматривается дифракция света на нанощели в метаматериалах. Располагая планарную гиперболическую линзу из многослойного метаматериала за экраном со щелью, можно добиться субволновой фокусировки света в такой линзе. В [17] получена фокусировка света в пятно  $\text{FWHM} = \lambda/10$ , в [18] при подобной оптической схеме –  $\lambda/5$ . В этих работах линза состоит из десятков слоёв серебра толщиной 5 нм и SiC толщиной 10 нм. Изготовление её на практике затруднительно.

Данная работа суммирует полезные качества щели шириной несколько десятков нанометров для локализации света и градиентной линзы для острой фокусировки света, например, линзы Микаэляна [19, 20]. Рассмотрена острая фокусировка света с помощью планарной градиентной линзы в двумерном случае с использованием щели для локализации света в узком пятне, шириной FWHM близким к ширине щели. Например, для планарной бинарной микролинзы в кремнии со щелью шириной 50 нм с энергетической эффективностью 44% формируется вблизи поверхности линзы фокусное пятно с шириной  $\text{FWHM} = \lambda/23$ . Это меньше, чем сообщалось во всех перечисленных выше работах [1–18]. Фокусировка производится на границе линзы, таким образом, острое фокусное световое пятно доступно для различных приложений нанопотоники. Отметим, что в работах

[4, 6, 7, 9–11, 13–15, 17–20] тоже рассматривался двумерный расчёт фокусировки света. Расчёт света градиентной линзой со щелью в двумерном случае позволяет получить качественную оценку фокусировки света. В трёхмерном случае результаты по эффективности и ширине фокусного пятна могут отличаться приблизительно на 30%, что показано в [19].

**Моделирование**

Схема рассматриваемой задачи представлена на рис. 1.

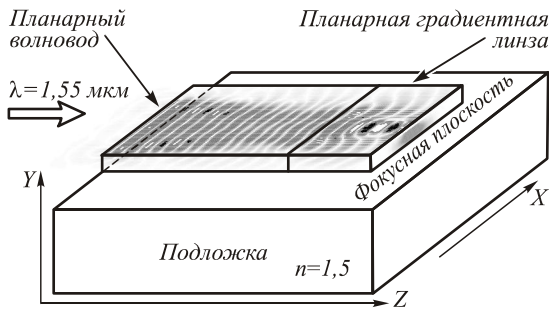


Рис. 1. Схема рассматриваемой задачи

Свет, выходящий из планарного волновода, выполненного из кремния ( $n_0=3,47$ ) на подложке из плавленого кварца, фокусируется градиентной линзой. Максимальный показатель преломления градиентной линзы на оптической оси равен показателю преломления в волноводе  $n_0$ .

На рис. 2 представлена схема планарной градиентной линзы со щелью. В качестве градиентной линзы рассмотрим планарную гиперболическую секансную (ГС) линзу, показатель преломления которой зависит от поперечной координаты  $x$  следующим образом [19, 20]:

$$n(x) = n_0 \frac{1}{ch\left(\frac{\pi x}{2H}\right)}, \tag{1}$$

где  $H$  – длина линзы.

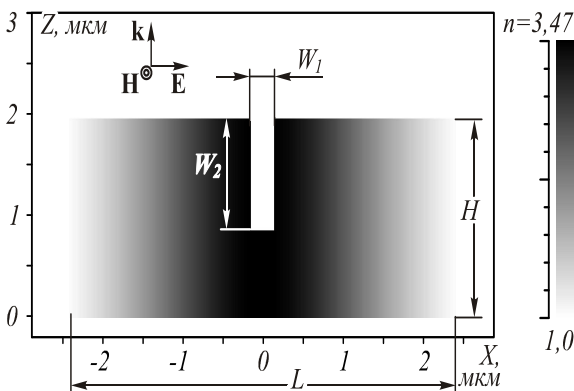


Рис. 2. Распределение показателя преломления (в полтонах) градиентной линзы со щелью, направления векторов электрического и магнитного полей показаны для случая ТМ-поляризации

Щель в планарной ГС линзе шириной  $W_1$  располагается на оптической оси линзы и доходит до выходной фокусной плоскости линзы. Щель может

проходить через всю линзу ( $W_2=H$ ) или находиться в последней части линзы ( $W_2<H$ ). Ширина щели  $W_1$  может быть менее дифракционного предела фокусировки света в материале линзы на оптической оси.

Моделирование распространения света через линзу проводилось методом FDTD, реализованным в коммерческом программном обеспечении FullWave (фирма RSoft). На рис. 3 представлен график распределения интенсивности в фокусной плоскости линзы без щели, на расстоянии 10 нм за выходной плоскостью линзы. Параметры моделирования:  $H=1,95$  мкм,  $L=4,8$  мкм, показатель преломления на оптической оси  $n=3,47$  (кремний), длина волны света  $\lambda=1,55$  мкм, падающая волна плоская, ТЕ-поляризация. Длина линзы  $H$  подобрана для оптимального фокусного пятна. Отметим, что в случае ТМ-поляризации качество фокусирования света градиентной линзой без щели будет намного хуже (фокусное пятно будет шире в 4 раза, а боковые лепестки близ фокуса будут составлять приблизительно половину от фокусного пятна).

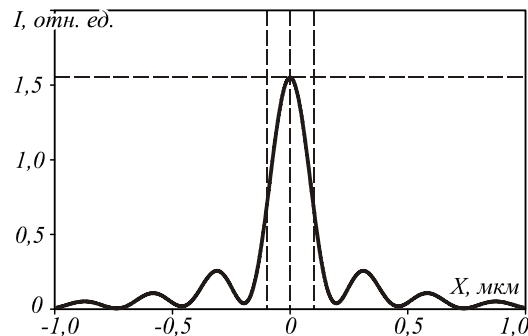


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения в фокусе линзы  $|E_y|^2$  при отсутствии щели, падающая волна имеет ТЕ-поляризацию

На рис. 3 ширина фокусного пятна по полуспаду интенсивности  $FWHM=0,181$  мкм  $=0,117\lambda$ . Это значение меньше дифракционного предела в среде, который составляет для данного показателя преломления  $FWHM=0,44(\lambda/3,47)=0,127\lambda$ . Покажем, что, используя щель на оптической оси линзы с показателем преломления в щели  $n=1$  и начальное световое поле с ТМ-поляризацией, можно достичь более острой фокусировки света. На рис. 4а приведён график зависимости ширины фокусного пятна  $FWHM$  от ширины щели  $W_1$ . Длина щели была взята равной длине линзы  $W_2=H=2,2$  мкм, остальные параметры моделирования такие же, что и для рис. 3.

Из рис. 4а видно, что ширина фокусного пятна по полуспаду интенсивности линейно зависит от ширины щели в линзе  $W_1$ , фокусное пятно немного шире её. На рис. 4б приведён график зависимости интенсивности в фокусе линзы при  $W_1=50$  нм. Видно, что интенсивность света в фокусе линзы со щелью примерно в 6,5 раз больше, чем в случае линзы без щели (рис. 3) при прочих равных параметрах.

Дифракционная эффективность фокусировки света  $\eta_D$  планарной градиентной линзой со щелью в область, близкую к ширине щели, также зависит от

ширины щели  $W_1$ . Максимум эффективности фокусирования света наблюдается при  $W_1 \approx 40$  нм, при увеличении ширины щели наблюдается спад эффективности  $\eta_D$  (рис. 5а). Такой эффект обуславливается, во-первых, уменьшением интенсивности света в фокусе при увеличении ширины щели  $W_1$  (рис. 5б), а во-вторых, изменением боковых лепестков и, как следствие, изменением  $\eta_D$ . Эффективность  $\eta_D$  рассчитывалась как отношение энергии, заключённой в центральном лепестке картины дифракции в фокусе (приблизительно  $-75 \text{ нм} < X < 75 \text{ нм}$  на рис. 4б), ко всей энергии, пришедшей в выходную плоскость шириной  $L$ .

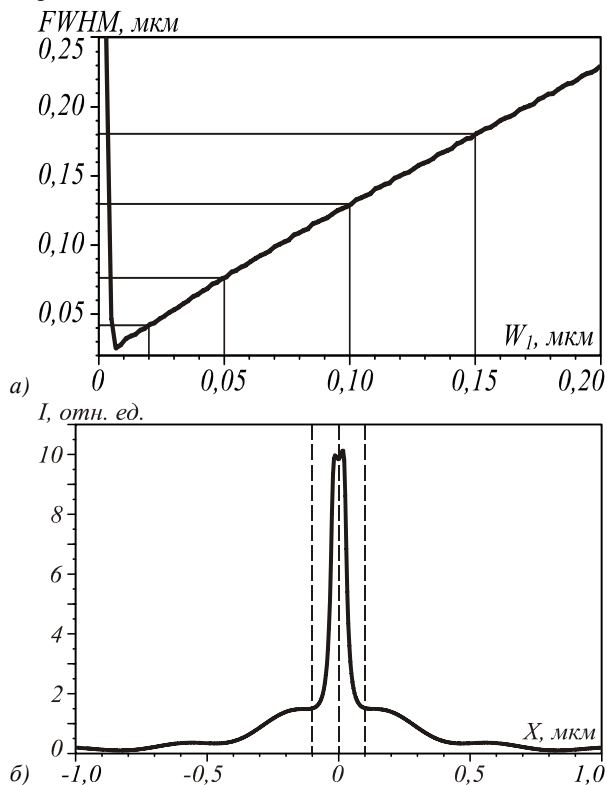


Рис. 4. Зависимость ширины фокусного пятна по полуспаду интенсивности от ширины щели  $W_1$  (а), распределение интенсивности  $I = |E_x|^2 + |E_z|^2$  в фокусной плоскости (10 нм от линзы) при  $W_1 = 50$  нм (б)

Из рис. 4а также видно, что при ширине щели  $W_1 < 5$  нм ширина фокуса начинает расти. При этом минимальная ширина фокусного пятна достигается при  $W_1 = 5$  нм и равна  $\text{FWHM} = 13 \text{ нм} = \lambda/119$ . Для сравнения на рис. 3 фокусное пятно имеет ширину  $\text{FWHM} = \lambda/8$  и эффективность  $\eta_D = 60\%$ .

Из рис. 5 видно, что при рассматриваемых параметрах максимальная эффективность равна  $\eta_D = 39,9\%$ , а ширина фокусного пятна при этом равна  $\text{FWHM} = 55 \text{ нм} = \lambda/28$  (см. рис. 4б).

На рис. 6 показаны зависимости эффективности фокусировки света  $\eta_D$  (6а) и интенсивности света в фокусе линзы (6б) от длины щели  $W_2$  для фиксированной ширины щели  $W_1 = 50$  нм. Для расчёта эффективности  $\eta_D$  здесь так же, как и для рис. 5, учитывалась область наиболее острой части фокусного пятна (до ближайших боковых лепестков) и была

взята  $-75 \text{ нм} < X < 75 \text{ нм}$ . Из рис. 6 видно, что в отсутствие щели ( $W_1 = W_2 = 0$ ) дифракционная эффективность фокусирования света около 10%.

Видно, что максимальные значения эффективности фокусировки  $\eta_D$  и интенсивности светового поля возникают при длине щели, обеспечивающей задержку фазы на  $\lambda/2$ , что при рассматриваемой длине волны и показателе преломления соответствует  $W_2 = \lambda/(2(n_0 - 1)) = 0,314 \text{ мкм}$ . Эффективность фокусировки света в этом случае достигает  $\eta_D = 43,4\%$ . При этом интенсивность света в фокусе линзы больше приблизительно на 20% (рис. 6в), а боковые лепестки менее выражены, чем в случае  $W_2 = H$  (рис. 4б). Из рис. 6г видно, что наибольших значений интенсивности светового поля достигает приблизительно на расстоянии 30 нм от края линзы внутри щели.

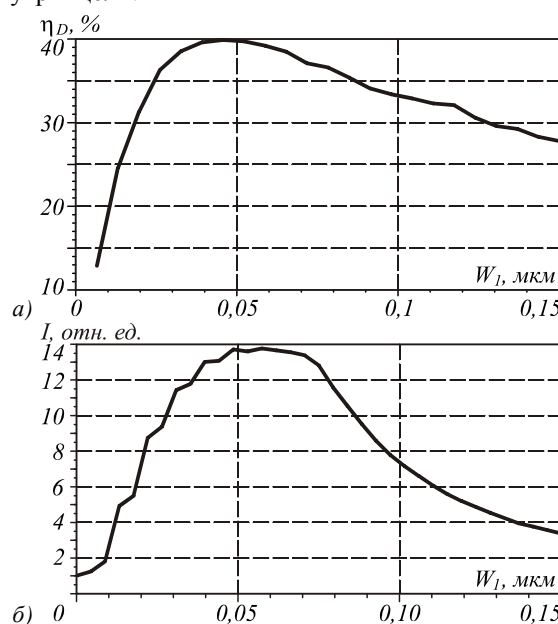
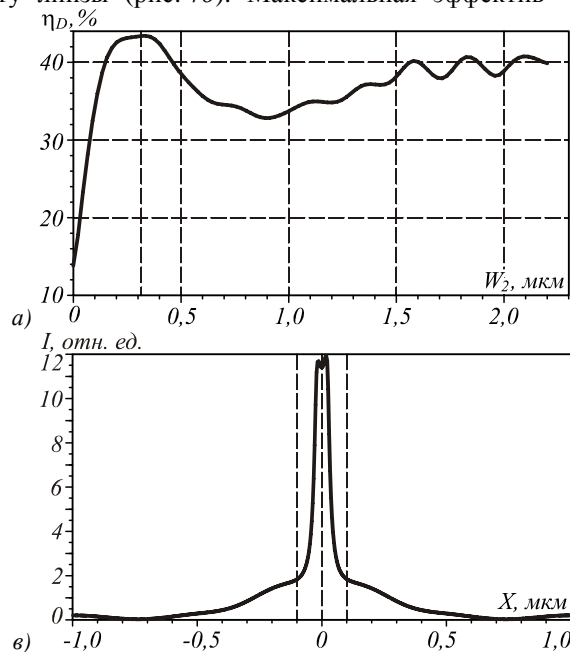


Рис. 5. Зависимость эффективности фокусировки света  $\eta_D$  (а) и интенсивности в произвольных единицах в фокусе линзы (б) от ширины щели  $W_1$ ,  $W_2 = H$

Так как линзу с градиентным распределением показателя преломления сложно изготовить современными средствами нанолитографии, для подобной острой фокусировки ТМ-поляризованной волны можно использовать фотонно-кристаллическую линзу со щелью на оптической оси, аналогичную градиентной линзе по среднему распределению показателя преломления. На рис. 7а показано распределение показателя преломления в плоскости XZ фотонно-кристаллической линзы, аналогичной градиентной линзе (рис. 2).

Параметры линзы на рис. 7а: 8 рядов отверстий вдоль оси Z, 20 рядов отверстий вдоль оси X с шахматным расположением, минимальный диаметр отверстий – 30 нм, максимальный – 250 нм, длина линзы – 2 мкм, ширина – 4,8 мкм, показатель преломления материала линзы  $n = 3,47$ ,  $W_1 = 50$  нм,  $W_2 = 0,25$  мкм. Для такой линзы зависимость эффективности фокусировки света  $\eta_D$  от длины щели  $W_2$

при фиксированном значении ширины щели  $W_1 = 50$  нм выглядит аналогично градиентному варианту линзы (рис. 7б). Максимальная эффектив-



ность фокусировки света в фокусное пятно составляет  $\eta_D = 44,3\%$  при  $W_2 = 0,25$  мкм. Ширина такого фокусного пятна  $\text{FWHM} = 0,044\lambda$ .

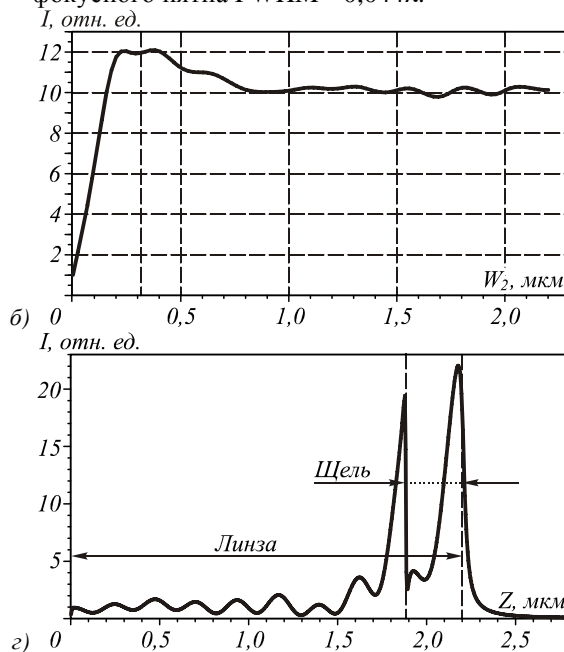


Рис. 6. Зависимость эффективности фокусировки света  $\eta_D$  (а) и интенсивности света в фокусе линзы (б) от длины щели  $W_2$  при  $W_1 = 50$  нм; распределение интенсивности света на 10 нм за линзой при  $W_1 = 50$  нм,  $W_2 = 0,31$  мкм (в) и на оптической оси (г)

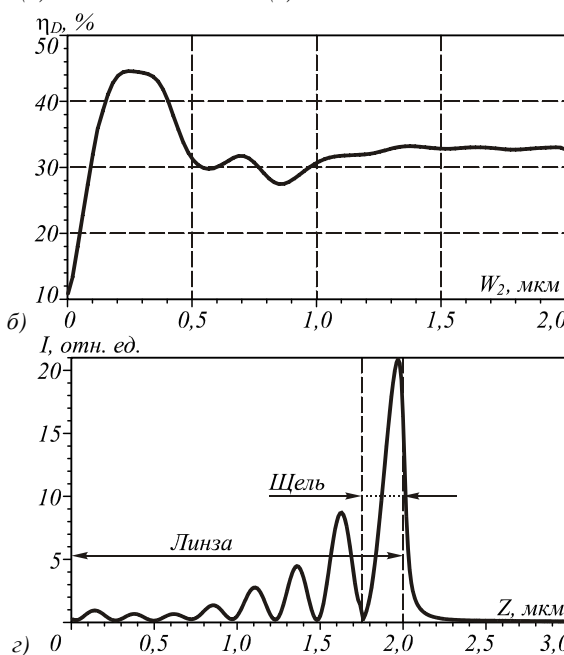
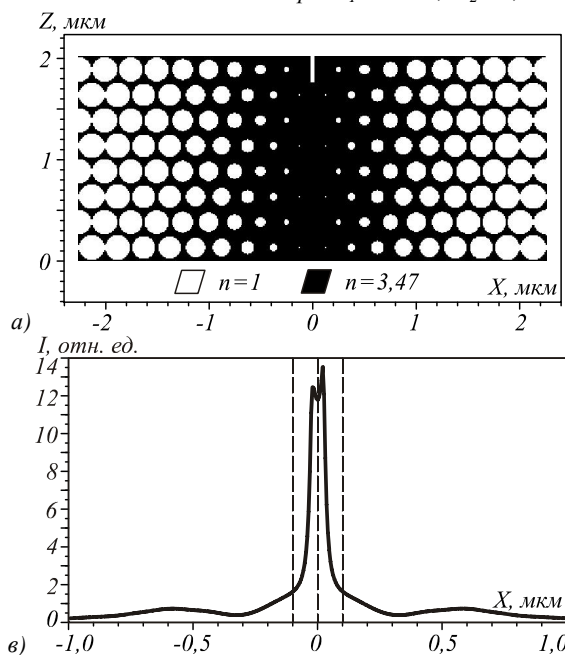


Рис. 7. Распределение показателя преломления в фотонно-кристаллической линзе со щелью (а), зависимость дифракционной эффективности  $\eta_D$  от длины щели  $W_2$  при ширине щели  $W_1 = 50$  нм (б), распределение интенсивности в фокусе в поперечной плоскости на 10 нм за линзой (в) и на оптической оси (г)

**Заключение**

В работе получены следующие результаты:

1. С помощью 2D FDTD-метода показано, что если в планарной градиентной гиперболической секансной микролинзе на основе кремния размером  $5 \times 2$  мкм сделать наноотверстие на оптической оси шириной 50 нм и длиной около 300 нм, то для падающей плоской волны с ТМ-поляризацией на выходе линзы сформируется

фокусное пятно с эффективностью  $\eta_D = 43\%$  и шириной  $\text{FWHM} = 0,035\lambda = \lambda/28$ . Это фокусное пятно меньше всех рассмотренных ранее в работах [1 – 20].

2. С помощью 2D FDTD-метода показано, что планарная фотонно-кристаллическая микролинза в кремнии, являющаяся бинарным аналогом градиентной гиперболической секансной микролинзы с наноотверстием в выходной плоскости на оптиче-

ской оси шириной 50 нм и длиной 250 нм, фокусирует плоскую волну с ТМ-поляризацией в фокусное пятно шириной  $\text{FWHM} = 0,044\lambda = \lambda/23$  с дифракционной эффективностью  $\eta_D = 44\%$ . Это фокусное пятно также меньше субволновых фокусных пятен из работ [1–20].

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», соглашение № 8027), грантов Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-4128.2012.9) и молодого кандидата наук (МК-3912.2012.2) и грантов РФФИ (12-07-00269, 12-07-31117, 13-07-97008).

### 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. – V. 9, N 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. – V. 16, N 13. – P. 9554-9564.
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. – V. 36, N 18. – P. 3536-3538.
4. **Ma, C.** Focusing light into deep subwavelength using metamaterial immersion lenses / C. Ma, Z. Liu // Opt. Express. – 2010. – V. 18, N 5. – P. 4838-4844.
5. **Doerr, C.R.** Circular grating coupler for creating focused azimuthally and radially polarized beams / C.R. Doerr, L.L. Buhl // Opt. Letters. – 2011. – V. 36, N 7. – P. 1209-1211.
6. **Kotlyar, V.V.** Modeling the sharp focus of a radially polarized laser mode using a conical and a binary microaxicon / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev // J. Opt. Soc. Am. B. 2010. – V. 27, N 10. – P. 1991-1997.
7. **Thongrattanasiri, S.** Design of hyper-gratings for far field subwavelength focusing in planar geometry / S. Thongrattanasiri, V.A. Podolsky // Proceedings of International Quantum Electronics Conference, Baltimore, Maryland, Joint IQEC Poster Session III, 2009.
8. **Ye, F.** Subwavelength vortical plasmonic lattice solitons / Opt. Letters. – 2011. – V. 36, N 7. – P. 1179-1181.
9. **Chen, K.R.** Focusing of light beyond the diffraction limit of half the wavelength / K.R. Chen // Opt. Letters. – 2010. – V. 35, N 22. – P. 3763-3765.
10. **Ishii, S.** Gold Nanoslit Lenses / S. Ishii, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev, K.-P. Chen, V.P. Drachev // Proceedings of Quantum Electronics and Laser Science Conference, CLEO'2011, Baltimore, Maryland.
11. **Ren, G.** Off-axis characteristic of subwavelength focusing in anisotropic metamaterials / G. Ren, C. Wang, Z. Zhao, X. Tao, X. Luo // J. Opt. Soc. Am. B. – 2012. – V. 29, N 11. – P. 3103-3108.
12. **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, N 11. – P. 1209-1211.
13. **Котляр, В.В.** Субволновая локализация света в волноводных структурах / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв, Я.Ю. Шу-

- юпова, А.Г. Налимов, В.А. Соيفер // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 169-186.
14. **Chien, H.T.** Focusing of electromagnetic waves by periodic arrays of air holes with gradually varying radii / H.T. Chien and C.C. Chen // Opt. Exp. – 2006. – V. 14. – P. 10759.
  15. **Kurt, H.** Graded index photonic crystals / H. Kurt, D.S. Citrin // Optics Express. – 2007. – V. 15. – P. 1240-1252.
  16. **Cheng, Z.** Focusing subwavelength grating coupler for mid-infrared suspended membrane waveguide / Z. Cheng, X. Chen, C.Y. Wong, K. Xu, C.K.Y. Fung, Y.M. Chen, H.K. Tsang // Opt. Letters. – 2012. – V. 37, N 7. – P. 1217-1219.
  17. **Ren, G.** Subwavelength focusing of light in the planar anisotropic metamaterials with zone plates / G. Ren, Z. Lai, C. Wang, Q. Feng, L. Liu, K. Liu, X. Luo // Opt. Express. – 2010. – V. 18, No. 17. – P. 18151-18157.
  18. **Li, G.** Subwavelength focusing using a hyperbolic medium with a single slit / G. Li, J. Li, K.W. Cheah // Appl. Optics. – 2011. – V. 50, N 31. – P. G27-G30.
  19. **Котляр, В.В.** Оптимизация параметров планарной бинарной линзы для видимого диапазона излучения / В.В. Котляр, А.Г. Налимов // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 3. – С. 327-332.
  20. **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. – V. 2012. – P. 1-9.

### References

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. – V. 9, N 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. – V. 16, N 13. – P. 9554-9564.
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. – V. 36, N 18. – P. 3536-3538.
4. **Ma, C.** Focusing light into deep subwavelength using metamaterial immersion lenses / C. Ma, Z. Liu // Opt. Express. – 2010. – V. 18, N 5. – P. 4838-4844.
5. **Doerr, C.R.** Circular grating coupler for creating focused azimuthally and radially polarized beams / C.R. Doerr, L.L. Buhl // Opt. Letters. – 2011. – V. 36, N 7. – P. 1209-1211.
6. **Kotlyar, V.V.** Modeling the sharp focus of a radially polarized laser mode using a conical and a binary microaxicon / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev // J. Opt. Soc. Am. B. 2010. – V. 27, N 10. – P. 1991-1997.
7. **Thongrattanasiri, S.** Design of hyper-gratings for far field subwavelength focusing in planar geometry / S. Thongrattanasiri, V.A. Podolsky // Proceedings of International Quantum Electronics Conference, Baltimore, Maryland, Joint IQEC Poster Session III, 2009.
8. **Ye, F.** Subwavelength vortical plasmonic lattice solitons / Opt. Letters. – 2011. – V. 36, N 7. – P. 1179-1181.
9. **Chen, K.R.** Focusing of light beyond the diffraction limit of half the wavelength / K.R. Chen // Opt. Letters. – 2010. – V. 35, N 22. – P. 3763-3765.
10. **Ishii, S.** Gold Nanoslit Lenses / S. Ishii, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev, K.-P. Chen, V.P. Drachev // Proceedings of Quantum Electronics and Laser Science Conference, CLEO'2011, Baltimore, Maryland.

11. **Ren, G.** Off-axis characteristic of subwavelength focusing in anisotropic metamaterials / G. Ren, C. Wang, Z. Zhao, X. Tao, X. Luo // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2012. – V. 29, N 11. – P. 3103-3108.
12. **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, N 11. – P. 1209-1211.
13. **Kotlyar, V.V.** Subwavelength light localization in waveguide structures / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, Y.Y. Shuyupova, A.G. Nalimov, V.A. Soifer // *Computer optics.* – 2010. – V. 34, N 2. – P. 169-186. – (In Russian).
14. **Chien, H.T.** Focusing of electromagnetic waves by periodic arrays of air holes with gradually varying radii / H.T. Chien and C.C. Chen // *Opt. Exp.* – 2006. – V. 14. – P. 10759.
15. **Kurt, H.** Graded index photonic crystals / H. Kurt, D.S. Citrin // *Optics Express.* – 2007. – V. 15. – P. 1240-1252.
16. **Cheng, Z.** Focusing subwavelength grating coupler for mid-infrared suspended membrane waveguide / Z. Cheng, X. Chen, C.Y. Wong, K. Xu, C.K.Y. Fung, Y.M. Chen, H.K. Tsang // *Opt. Letters.* – 2012. – V. 37, N 7. – P. 1217-1219.
17. **Ren, G.** Subwavelength focusing of light in the planar anisotropic metamaterials with zone plates / G. Ren, Z. Lai, C. Wang, Q. Feng, L. Liu, K. Liu, X. Luo // *Opt. Express.* – 2010. – V. 18, No. 17. – P. 18151-18157.
18. **Li, G.** Subwavelength focusing using a hyperbolic medium with a single slit / G. Li, J. Li, K.W. Cheah // *Appl. Optics.* – 2011. – V. 50, N 31. – P. G27-G30.
19. **Kotlyar, V.V.** Optimization of parameters of planar binar lens for visible light / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov // *Computer optics.* – 2012. – V. 36, N 3. – P. 327-332. – (In Russian).
20. **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. – V. 2012. – P. 1-9.

## HYPERBOLIC SECANT LENS WITH A SLIT FOR SUBWAVELENGTH LIGHT FOCUSING

A.G. Nalimov, V.V. Kotlyar

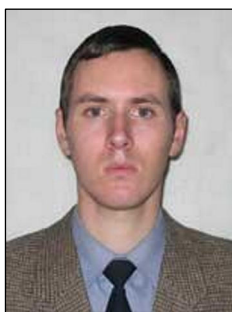
*Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Science*

### Abstract

A modeling by FDTD method shown, that binary photonic crystal secant hyperbolic micro lens made of Si ( $n_0=3,47$ ), with size of  $2 \times 5 \mu\text{m}$  with a slit width of 50 nm and length of 250 nm focuses TM-polarized flat wave in a focal spot near exit surface of lens. Focal spot FWHM size is  $\lambda/23$ , diffractive efficiency of the lens is 44%, and the focal intensity is 10 times more then the intensity of the incident light.

*Key words:* superresolution, slit, planar waveguide, gradient lens, Mikaelian lens, subwavelength focusing.

### Сведения об авторах



**Налимов Антон Геннадьевич**, 1980 года рождения, окончил Самарский государственный аэрокосмический университет в феврале 2003 года по специальности «Физика». Поступил в очную аспирантуру СГАУ по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в 2003 году, окончил её по специальности 01.04.05 «Оптика» в 2006 году. Работает на кафедре технической кибернетики СГАУ в должности доцента, в Институте систем обработки изображений РАН в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук, соавтор 65 работ и 2 патентов.

**Anton Gennadyevich Nalimov** (b. 1980), finished Samara State Aerospace University in February, 2003. Entered in postgraduate study in 2003 on speciality 05.13.18 "Mathematical modeling and program complexes", finished it in 2006 with speciality 01.04.05 "Optics". 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, coauthor of 65 papers and 2 inventions.

*Сведения об авторе Котляр Виктор Викторович – см. стр. 11 этого номера.*

*Поступила в редакцию 28 декабря 2012 г.*