

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СУБВОЛНОВОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА СЧЁТ ФОРМИРОВАНИЯ БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫХ СИНГУЛЯРНЫХ ЛИНИЙ С ПОМОЩЬЮ СУБВОЛНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МИКРОРЕЛЬЕФА

Дегтярев С.А., Хонина С.Н.

Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

Рассмотрена возможность формирования близкорасположенных сингулярных линий с помощью субволновых деталей диэлектрического микрорельефа. На основе численного моделирования показано, что картины дифракции для выступа и канавки субволнового размера $(0,2\lambda)$ кардинально различаются: выступ демонстрирует фокусирующие свойства, а канавка действует как препятствие. Использование в микрорельефе определённых сочетаний фазовых ступенек, соответствующих сдвигу фазы на π , позволяет достичь субволновой локализации излучения ($\text{FWHM}=0,36\lambda$). Дальнейшее сужение расстояния между сингулярными линиями приводит к уходу энергии из центральной области в боковые лепестки. Моделирование выполнено с помощью программного пакета Comsol, в котором численно решаются стационарные уравнения Максвелла методом конечных элементов.

Ключевые слова: фазовый скачок, сингулярные линии, метод конечных элементов.

Введение

Скачкообразное изменение высоты микрорельефа, соответствующее резкому изменению фазы, приводит к появлению фазовых дислокаций и формированию нулевых значений интенсивности. Так, линейные фазовые сингулярности, возникающие при переходе через ноль, были успешно использованы для эффективного формирования различных мод лазерного излучения [1–3], а также выравнивания интенсивности Гауссова пучка [4, 5] с помощью бинарных фазовых дифракционных оптических элементов.

Фазовые скачки бинарного рельефа оптического элемента обеспечивали задержку фазы на π и формирование сингулярных линий в дальней зоне, однако линии с нулевой интенсивностью формируются и в ближней зоне – сразу после прохождения диэлектрической ступеньки [6, 7].

В [6] представлены результаты, которые определяют минимальный размер одинарной фазовой планки для создания сингулярности в дальнем поле. А в работе [8] с помощью моделирования ближнепольного микроскопа было показано, что картина дифракции от двух диэлектрических полосок сильно зависит как от показателя преломления материала структуры, так и от наклона освещения структуры.

Таким образом, сингулярности рассеянного поля могут описывать геометрию объекта, что можно применять в метрологических целях [9, 10], к примеру, в полупроводниковой промышленности, где требуется измерение малых объектов неинвазивными методами.

В данной работе исследуется возможность формирования близкорасположенных сингулярных линий как в ближней, так и в дальней зоне с помощью скачков микрорельефа с различной конфигурацией. Моделирование осуществлялось путём численного решения стационарных уравнения Максвелла методом конечных элементов, реализованном в программном пакете Comsol.

1. Формирование сингулярной линии с помощью фазовой ступеньки

При формировании в дальней зоне высших мод Гаусса–Эрмита, содержащих линейные фазовые син-

гулярности, успешно используются скачки бинарного рельефа оптического элемента, обеспечивающие задержку фазы на π [1–3].

Рассмотрим дифракцию на фазовой ступеньке в ближней зоне и дальней зоне Гауссова пучка:

$$E_x(x, z=0) = E_0 \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где (x, z) – поперечная и продольная координаты; σ – радиус Гауссова пучка; E_0 – нормирующий множитель.

В расчётной модели Гауссов пучок проходит слева направо микрорельеф оптического элемента, имеющий показатель преломления 1,5, и выходит в свободное пространство (показатель преломления 1). Длина волны излучения полагается равной $\lambda = 532$ нм, радиус Гауссова пучка – $\sigma = 2$ мкм. Максимальный размер элемента расчётной сетки – $\lambda/20$. На рис. 1 приведены результаты расчётов, из которых хорошо видно формирование линии нулевой интенсивности как в ближней, так и в дальней зонах дифракции.

Все картины распределения амплитуды электрического поля в работе имеют следующее расположение координатных осей: по горизонтали вправо направлена оптическая ось (Oz), по вертикали вверх направлена ось (Ox).

На рис. 1а хорошо видно, что сразу после прохождения диэлектрической ступеньки на оптической оси формируется нулевая интенсивность за счёт интерференции двух частей пучка с приобретённым полуволновым фазовым сдвигом (график интенсивности на расстоянии $0,5\lambda$ не доходит до нуля из-за недостаточной дискретизации).

На рис. 1б видно, что поперечное распределение интенсивности является асимметричным, особенно в ближней зоне дифракции. Это связано с отражением части энергии от боковой поверхности ступеньки на границе воздух–диэлектрик (рис. 1а). Таким образом, можно предположить, что картины дифракции для диэлектрического выступа и канавки будут различными, а значит, один тип субволновой структуры будет влиять на картину дифракции сильнее, чем другой.

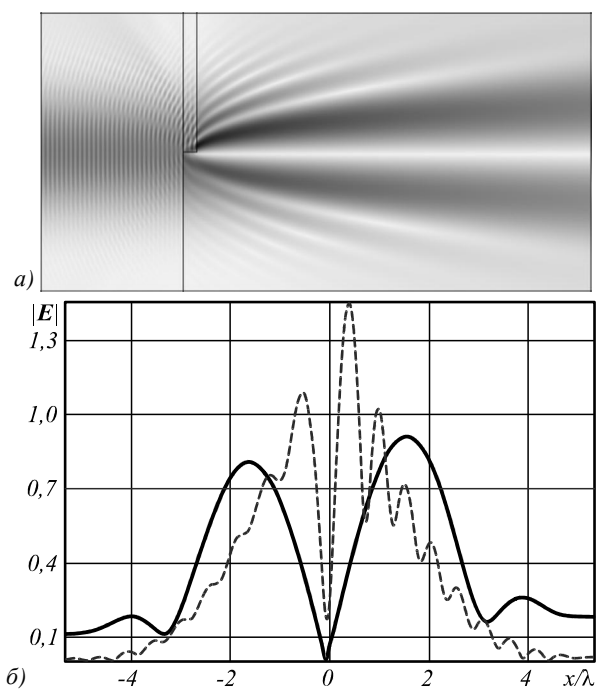


Рис. 1. Дифракция Гауссова пучка на отдельной фазовой π -ступеньке: продольная картина дифракции (негатив) (а), графики распределения интенсивности на расстоянии $0,5\lambda$ (пунктирная линия) и 20λ (сплошная линия) от края микрорельефа (б)

Также было проведено моделирование дифракции Гауссова пучка на фазовой π -ступеньке в случае, когда ось симметрии Гауссова пучка смещена на 500 нм относительно кромки фазовой ступеньки (рис. 2).

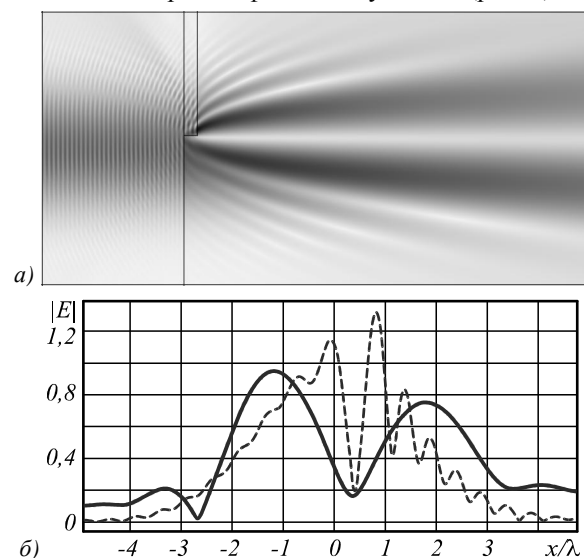


Рис. 2. Дифракция Гауссова пучка на отдельной фазовой π -ступеньке, кромка которой смещена на 500 нм относительно оси Гауссова пучка: продольная картина дифракции (негатив) (а), графики распределения интенсивности на расстоянии $0,5\lambda$ (пунктирная линия) и 20λ (сплошная линия) от края микрорельефа (б)

Из рис. 1 и 2 видно, что смещение оси Гауссова пучка относительно кромки фазовой ступеньки в пределах одной длины волны качественно не влияет на распределение амплитуды электрического поля.

Стоит отметить, что при заданном смещении сингулярная линия выражена хуже, так как минимум амплитуды электрического поля на рис. 2 равен примерно 0,4, что существенно больше минимума графика на рис. 1, который примерно равен 0.

2. Сравнение формирования близкорасположенных сингулярных линий с помощью микровыступа и микроканавки

В работе [6] было исследовано, насколько близко можно разместить две соседних фазовых ступеньки (т.е. минимальный размер фазовой канавки) так, чтобы формировались рядом находящиеся линии сингулярности (линии нулевой интенсивности). Было показано, что при слишком сильном сближении – уменьшении ширины канавки до $0,37\lambda$ – сингулярные линии перестают формироваться.

В данной работе мы дополнительно рассматриваем формирование двух близкорасположенных нулевых линий с помощью фазового выступа. Одним из результатов возможности расположить нулевые линии как можно ближе друг другу является локализация излучения в субволновой области, что необходимо во многих практических приложениях, в том числе в оптическом манипулировании [11].

Здесь и далее рассматривается направление вектора электрического поля падающего излучения вдоль выступа или канавки.

На рис. 3 приведены сравнительные картины дифракции на выступе и канавке шириной λ . Из картин видно, что выступ демонстрирует фокусирующие свойства, а действие канавки действует как преграда. При этом на расстоянии $0,5\lambda$ от края микрорельефа формируются близкорасположенные нулевые линии интенсивности. В случае выступа излучение, локализованное между этими линиями, имеет достаточно высокую интенсивность. Ширина локализованного излучения по полуспаду от максимума интенсивности $\text{FWHM} = 0,36\lambda$. Для канавки ширина оказалась ещё меньше – $\text{FWHM} = 0,35\lambda$, но при этом интенсивность локализованного излучения значительно ниже (рис. 3в).

Если уменьшать ширину дефекта, то в ближней зоне при дифракции на канавке центральный пик между сингулярными линиями исчезает, а при дифракции на выступе наблюдается ярко выраженный центральный пик, хотя при этом имеет место рост боковых лепестков, сравнимых по интенсивности с центральным пиком (рис. 4).

На рис. 4 приведены сравнительные картины дифракции на выступе и канавке шириной $0,2\lambda$. Из картин видно, что выступ даже такого существенно субволнового размера формирует в ближней зоне выраженные сингулярные линии. Отметим, однако, что расстояние между ними значительно увеличилось по сравнению с предыдущим случаем ($\text{FWHM} = 0,49\lambda$). Таким образом, уменьшение поперечного размера дефекта не приводит к лучшей локализации излучения между сингулярными линиями.

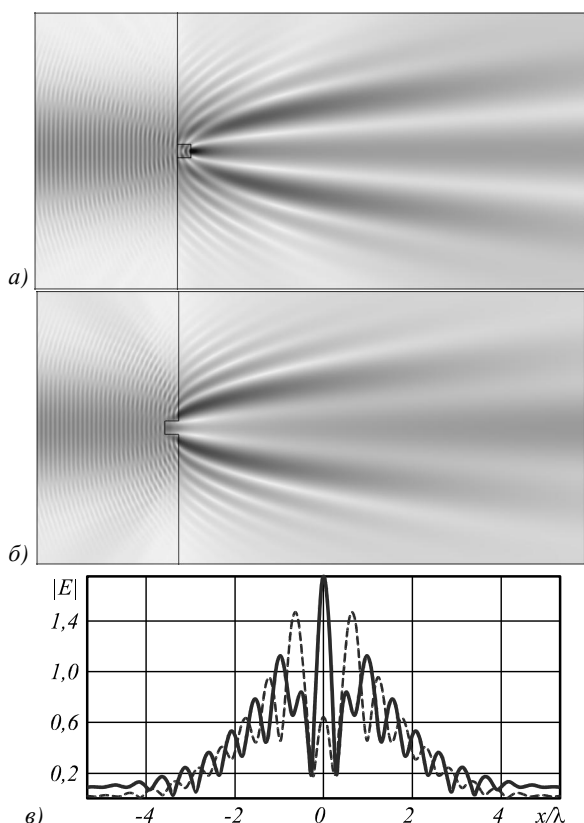


Рис. 3. Продольная картина (негатив) дифракции Гауссова пучка на π -выступе (а) и π -канавке (б) шириной λ и соответствующие графики распределения интенсивности на расстоянии $0,5\lambda$ для выступа (сплошная линия) и канавки (пунктирная линия) (в)

Тем не менее, сам факт кардинального различия картины дифракции (рис. 4в) на существенно субволновом дефекте является примечательным. Причём различие остаётся заметным и в дальней зоне (рис. 4г).

3. Дифракция на совместной конфигурации микровыступа и микроканавки

Рассмотрим прохождение Гауссова пучка через более сложные конфигурации, содержащие микровыступы и микроканавки с целью уменьшения ширины локализованного излучения. На рис. 5 показана дифракция на расположенных рядом канавке и выступе шириной λ каждый. Как видно (рис. 5а), в этом случае удаётся сформировать центральный пик меньшего размера, чем в предыдущих разделах ($\text{FWHM} = 0,31\lambda$). Однако сужение достигается за счёт потери энергии (боковые лепестки в 2 раза выше центрального пика). Такая ситуация полностью согласуется с теорией Торалдо ди Франция [12].

На рис. 6 показаны результаты дифракции на структуре, которую можно считать центральной частью цилиндрического бинарного аксикона. В этом случае в ближней зоне имеется выраженный центральный пик ($\text{FWHM} = 0,56\lambda$).

Рассмотренные микроструктуры и картины дифракции в ближней зоне могут служить тестовыми образцами при исследовании характеристик ближнепольных оптических микроскопов [13, 14].

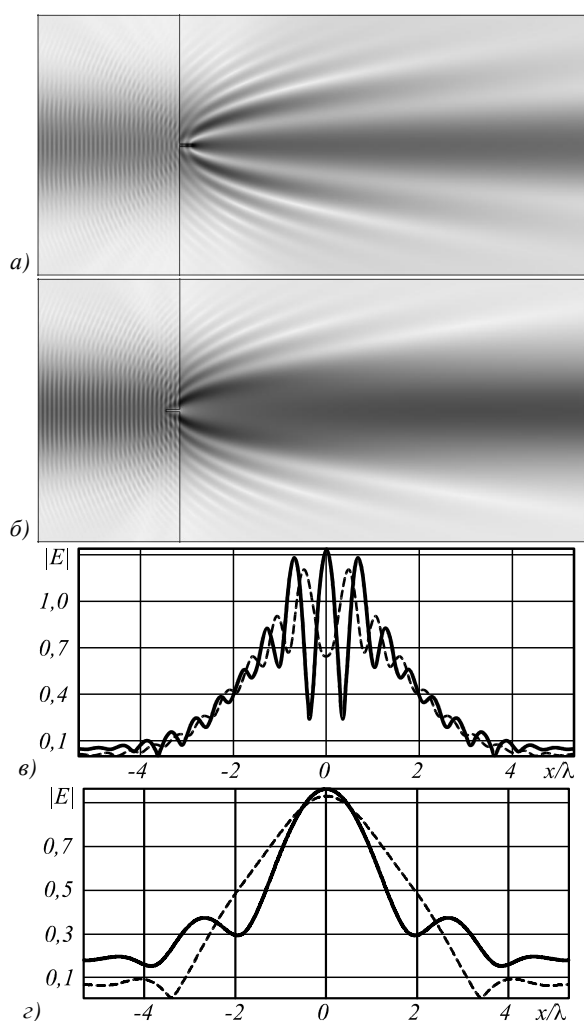


Рис. 4. Продольная картина (негатив) дифракции Гауссова пучка на π -выступе (а) и π -канавке (б) шириной $0,2\lambda$ и соответствующие графики распределения интенсивности на расстоянии $0,5\lambda$ (в) и 20λ (г) для выступа (сплошная линия) и канавки (пунктирная линия)

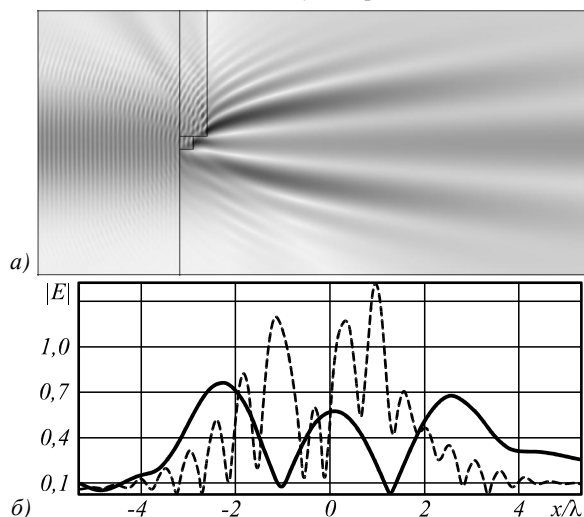


Рис. 5. Дифракция Гауссова пучка на расположенных рядом канавке и выступе шириной λ каждый: продольная картина дифракции (негатив) (а), графики распределения интенсивности на расстоянии $0,5\lambda$ (тонкая линия) и 20λ (толстая линия) от края микрорельефа (б)

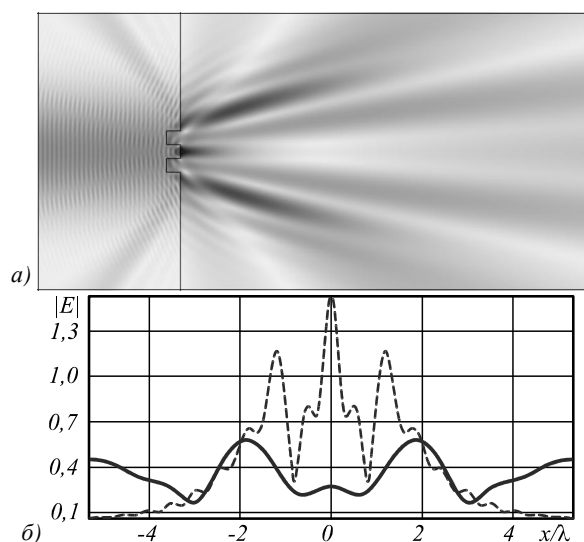


Рис. 6. Дифракция Гауссова пучка на выступе, окруженном канавками, шириной λ каждый: (а) продольная картина дифракции (негатив), (б) графики распределения интенсивности на расстоянии $0,5\lambda$ (пунктирная линия) и 20λ (сплошная линия) от края микрорельефа

Локальный характер формируемых областей с фазовыми особенностями (т.е. их наличие, например, только в ближней зоне) может быть использован для повышения чувствительности оптических пинцетов [11].

Заключение

Численное исследование методом конечных элементов дифракции Гауссова пучка на субволновых деталях микрорельефа показало существенное различие картины в ближней зоне для выступа и канавки: выступ демонстрирует фокусирующие свойства (даже для ширины выступа $0,2\lambda$), а канавка действует как препятствие. Причём различие в картине дифракции остаётся заметным даже в дальней зоне дифракции.

Использование в микрорельефе определённых сочетаний фазовых ступенек, соответствующих сдвигу фазы на π , позволяет достичь субволновой локализации излучения ($\text{FWHM} = 0,36\lambda$). Дальнейшее сужение расстояния между сингулярными линиями (вплоть до ($\text{FWHM} = 0,31\lambda$)) приводит к уходу энергии из центральной области в боковые лепестки.

Небольшое смещение (в пределах одной длины волны) оси Гауссова пучка относительно фазовой ступеньки слабо искажает картину дифракции и позволяет наблюдать сингулярную линию достаточно отчётливо.

Калибровка и исследование характеристик ближнепольных оптических микроскопов могут производиться с помощью исследованных в работе микроструктур.

Полученные фазовые сингулярности, наблюдаемые в ближней зоне, но не наблюдаемые в дальней зоне, могут быть использованы для повышения чувствительности оптических пинцетов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ 13-07-00266 и 13-07-97004p_поволжье_a) и

Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 09.04.2010 г. № 218: договор № 02.Г36.31.0001 от 12.02.2013.

Литература

1. **Хонина, С.Н.** Формирование мод Гаусса–Эрмита с помощью бинарных ДОО. I. Моделирование и эксперимент / С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Сойфер, М. Хонканен // Компьютерная оптика. – 1998 – Т. 18. – С. 24-28.
2. **Котляр, В.В.** Кодирование дифракционных оптических элементов методом локального фазового скачка / В.В. Котляр, С.Н. Хонина, А.С. Мелехин, В.А. Сойфер // Компьютерная оптика. – 1999. – Т. 19. – С. 54-64.
3. **Khonina, S.N.** Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams / S.N. Khonina, S.A. Balalayev, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, B. Paivanranta, J. Turunen // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2009. – Vol. 11 – P. 065702-065708.
4. **Котляр, В.В.** Выравнивание интенсивности фокального пятна сфокусированного гауссова пучка / В.В. Котляр, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 1998 – Т. 18. – С. 42-52.
5. **Khonina, S.N.** Levelling the focal spot intensity of the focused Gaussian beam / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // Journal of Modern optics. – 2000. – V. 47, N 5. – P. 883-904.
6. **Rockstuhl, C.** Theoretical and experimental investigation of phase singularities generated by optical micro- and nanostructures / C. Rockstuhl, M. Salt, H. P. Herzig // Journal of Optics. – 2004. – V. 6, N 5. – P. 271-276.
7. **Хонина, С.Н.** Дифракция на бинарных микроаксиконах в ближней зоне / С.Н. Хонина, Д.А. Савельев, П.Г. Серафимович, И.А. Пустовой // Оптический журнал. – 2012. – Т. 79, № 10. – С. 22-29.
8. **Furukawa, H.** Near-Field optical microscope images of a dielectric flat substrate with subwavelength strips / H. Furukawa, S. Kawata // Opt. Commun. – 2001. – Vol. 196. – P. 93-102.
9. **Тычинский, В.П.** Микроскопия субволновых структур / В.П. Тычинский // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1219-1229.
10. **Тычинский, В.П.** Сверхразрешение и сингулярности в фазовых изображениях / В.П. Тычинский // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 11. – С. 1205-1213
11. **Allen, H.** Optical manipulation of nanoparticles and biomolecules in sub-wavelength slot waveguides / H. Allen, J. Yang, Sean D. Moore, Bradley S. Schmidt, Matthew Klug, Michal Lipson & David Erickson // Nature. – 2009. – V. 457. – P. 71-75.
12. **Torraldo di Francia, G.** Degrees of freedom of an image / G. Torraldo di Francia // J. Opt. Soc. Am. – 1969. – V. 59. – P. 799-804.
13. **Simpson, S.H.** Analysis of the effects arising from the near-field optical microscopy of homogeneous dielectric slabs / S.H. Simpson, S. Hanna // Opt. Commun. – 2001. – V. 196. – P. 17-31.

References

1. **Khonina, S.N.** Formation of Gaussian-Hermite modes using binary DOEs. I. Modeling and experiments / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, M. Honkanen, J. Turunen // Computer Optics. – 1998. – V. 18. – P. 24-28. – (In Russian).
2. **Kotlyar, V.V.** Coding diffractive optical elements using the method of a local phase jump / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, A.S. Melekhin, V.A. Soifer // Computer Optics. – 1999. – V. 19. – P. 54-64. – (In Russian).
3. **Khonina, S.N.** Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams / S.N. Khonina, S.A. Balalayev,

- R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, B. Paivanranta, J. Turunen // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2009. – Vol. 11 – P. 065702-065708.
4. **Kotlyar, V.V.** Leveling intensity of focused Gaussian spot / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina // Computer Optics. – 1998. – V. 18. – P. 42-52.
 5. **Khonina, S.N.** Levelling the focal spot intensity of the focused Gaussian beam / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // Journal of Modern optics. – 2000. – V. 47, N 5. – P. 883-904.
 6. **Rockstuhl, C.** Theoretical and experimental investigation of phase singularities generated by optical micro- and nano-structures / C. Rockstuhl, M. Salt, H.P. Herzig // Journal of Optics – 2004. – V. 6, N 5. – P. 271-276.
 7. **Khonina, S.N.** Diffraction at binary microaxicons in the near field / S.N. Khonina, P.G. Serafimovich, D.A. Savelyev, I.A. Pustovoi // J. Opt. Technol. – 2012. – V. 79, N 10. – P. 626-631.
 8. **Furukawa, H.** Near-Field optical microscope images of a dielectric flat substrate with subwavelength strips / H. Furukawa, S. Kawata // Opt. Commun. – 2001. – Vol. 196. – P. 93-102.
 9. **Tychinsky, V.P.** Microscopy of subwavelength structures / V.P. Tychinsky // Advances of Physical Sciences. – 1996. – V. 166, N 11. – P. 1219-1229. – (In Russian).
 10. **Tychinsky, V.P.** Superresolution and singularities in phase images / V.P. Tychinsky // Advances of Physical Sciences. – 2008. – V. 178, N 11. – P. 1205-1213. – (In Russian).
 11. **Allen, H.** Optical manipulation of nanoparticles and biomolecules in sub-wavelength slot waveguides / H. Allen, J. Yang, Sean D. Moore, Bradley S. Schmidt, Matthew Klug, Michal Lipson & David Erickson // Nature. – 2009. – V. 457. – P. 71-75.
 12. **Toraldo di Francia, G.** Degrees of freedom of an image / G. Toraldo di Francia // J. Opt. Soc. Am. – 1969. – V. 59. – P. 799-804.
 13. **Simpson, S.H.** Analysis of the effects arising from the near-field optical microscopy of homogeneous dielectric slabs / S.H. Simpson, S. Hanna // Opt. Commun. – 2001. – V. 196. – P. 17-31.

STUDY OF SUBWAVELENGTH LOCALIZATION OF A RADIATION BY FORMING CLOSELY SPACED SINGULAR LINES USING OF SUBWAVELENGTH FEATURES OF THE DIELECTRIC MICRO-RELIEF

S.A. Degtyarev, S.N. Khonina

Image Processing Systems Institute of the RAS

Abstract

The possibility of formation of closely spaced singular lines using subwavelength details of the dielectric micro-relief is examined. A numerical simulation shows that the diffraction pattern for the subwavelength ridge and groove (size of $0,2\lambda$) are drastically different: the ridge shows the focusing properties, and the groove acts as a barrier. Micro-relief with specific combinations of phase steps, corresponding to a phase shift of π , allows to achieve the sub-wavelength localization of radiation (FWHM = $0,36\lambda$). Further narrowing the distance between the singular lines leads to loss of energy in the central region and growth of the sidelobes. Simulations were performed using the finite element method, implemented in the Comsol software product.

Key words: phase jump, singular lines, finite element method.

Сведения об авторах



Дегтярев Сергей Александрович, аспирант, стажёр-исследователь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная и сингулярная оптика.

E-mail: sealek@gmail.com.

Sergei Alexandrovich Degtyarev, post-graduate student, trainee-researcher of the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Research interests: diffractive and singular optics.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет); ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений.

E-mail: khonina@smr.ru.

Svetlana Nikolaevna Khonina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (National Research University). Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing.



Поступила в редакцию 16 сентября 2013 г.