

УДК 535.42

**ВЛИЯНИЕ СУБВОЛНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ МИКРОРЕЛЬЕФА
НА КАРТИНУ ДИФРАКЦИИ ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ**© 2014 Д. А. Савельев¹, С. Н. Хонина²¹ Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)² Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

В статье исследуется влияние на картину дифракции субволновых деталей микрорельефа при двух различных способах травления: позитивном и негативном. Моделирование дифракции однородно-поляризованного излучения, соответствующего как Гауссову пучку, так и вихревой моде Гаусса – Лагерра, выполнено методом решения уравнений Максвелла конечными разностями во временной области (FDTD). Определены характеристики и особенности картины дифракции в ближней зоне, в том числе связанные с формированием продольной компонентой электрического поля.

Позитивный и негативный рельеф, гауссовы моды, пучки с вихревой фазой, FDTD, Меер, однородная поляризация, π -скачок фазы.

Одним из основных методов получения интегральных микросхем и бинарных рельефов является литография. В её основе лежит формирование микрорельефа в фоторезисте, который обеспечивает возможность последующего травления материала подложки. В результате формируется негативный или позитивный микрорельеф [1, 2]. В работе [1] для уменьшения поперечных размеров деталей микрорельефа предлагается использовать деструктивную интерференцию за счёт фазового сдвига на π радиан. Наличие в волновом фронте такой фазовой дислокации приводит к формированию нулевой интенсивности в этой области пространства [3, 4].

Фазовые дислокации, определяющие нулевую интенсивность, представляют собой перспективное средство в метрологии. Так как точность определения положения дислокации не ограничена классическим дифракционным пределом (градиент изменения фазы в этом случае неограниченно возрастает), а лишь отношением сигнал/шум, то геометрия объекта при условии наличия априорной информации об объекте может быть определена с очень высокой точностью [5]. На этом подходе основывается метод оптико-

вихревой метрологии [6], успешно применённый в оптико-вихревом интерферометре, позволяющем отслеживать смещения с нанометрической точностью [7]. Чувствительность сингулярных пучков к изменениям волнового фронта и различного рода дефектам также может использоваться для тестирования поверхностей [8].

Заметим, что детали микрорельефа, сравнимые с длиной волны падающего излучения, существенно влияют на картину дифракции в ближней зоне. В работе [9] была показана возможность острой фокусировки Гауссова пучка оптическим микроэлементом, состоящим из двух соосных кольцевых зон, причём радиус центральной зоны был порядка длины волны.

Внесение в освещающий пучок линейной или вихревой фазовой сингулярности может быть использовано для изменения картины дифракции за счёт перераспределения энергии между компонентами электромагнитного поля [10-13].

В данной работе исследуется влияние на картину дифракции в ближней зоне нескольких факторов: типа деталей рельефа (выступ или канавка), размера деталей, типа падающего пучка (гауссов пучок

или вихревой), а также поляризации излучения (линейная, круговая).

Численное моделирование выполнено на основе решения уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области (FDTD), реализованном в программном продукте Меер [14]. В результате исследований определены характеристики и особенности картины дифракции, в том числе связанные с формированием продольного компонента элект-

рического поля, в зависимости от перечисленных выше факторов.

1. Сравнение дифракции на отдельном выступе или канавке субволнового размера

Рассматриваются два типа лазерных пучков, сохраняющих свою структуру при распространении в свободном пространстве, которые могут быть произведены в лазерных резонаторах:

- фундаментальная Гауссова мода:

$$GS(x, y, z) = \frac{\sigma_0}{\sigma(z)} \exp[ikz - i\eta(z)] \exp\left[\frac{i\pi(x^2 + y^2)}{\lambda R(z)}\right] \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2(z)}\right], \quad (1)$$

- мода Гаусса-Лагерра (0,1):

$$GL_{01}(r, \varphi, z) = \left(\frac{\sqrt{2}r}{\sigma(z)}\right) \exp[ikz - i2\eta(z)] \exp\left[\frac{i\pi r^2}{\lambda R(z)}\right] \exp\left[-\frac{r^2}{\sigma^2(z)}\right] \exp(i\varphi). \quad (2)$$

На рис. 1 показан внешний вид рассматриваемых пучков. Следует отметить, что рассматривается достаточно широкий Гауссов пучок ($\sigma = 14,56\lambda$). В первой части работы будем рассматривать только общую интенсивность.

На рис. 2 показан профиль оптического микрорельефа с отдельным выступом (а) или углублением (б). Внешний радиус элемента был зафиксирован и равен $R=10\lambda$, а радиус центральной зоны (внутренний радиус) r_1 принимал значения от $0,25\lambda$ до λ .

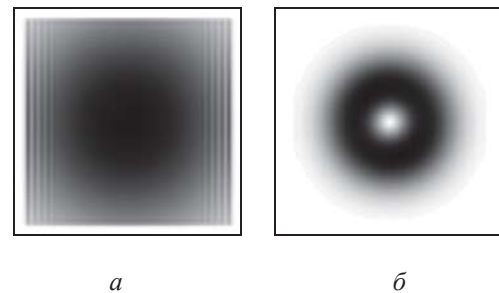


Рис. 1. Падающие пучки: а – фундаментальная Гауссова мода ($\sigma = 14,56\lambda$), б – мода Гаусса-Лагерра (0,1) ($\sigma = 3,5\lambda$)

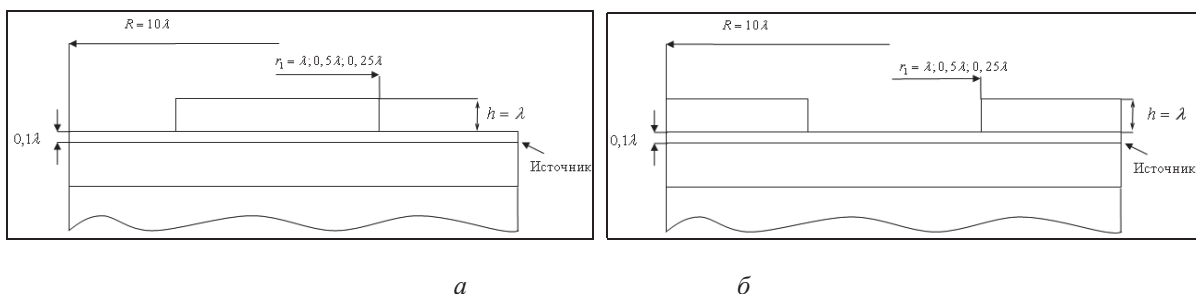


Рис. 2. Профиль оптического микрорельефа с отдельным выступом (а) и углублением (б)

Для моделирования дифракции использовался программный пакет Meep. Расчёты производились с использованием вычислительного кластера мощностью 775 GFlops. Характеристики кластера: количество ядер – 116, вычислительные узлы: 7 сдвоенных серверов HP ProLiant 2xBL220c, объём RAM 112 Гб.

Параметры моделирования: длина волны излучения $\lambda = 0,532$ мкм, размер расчётной области $x, y, z \in [-10\lambda; 10\lambda]$. Толщина поглощающего слоя PML, со всех сторон окружающего расчётную область, $-1,5\lambda$, шаг дискретизации по пространству – $\lambda/40$, шаг дискретизации по времени – $\lambda/(80c)$ (в соответствии с условием Куранта), где c – скорость света. Ис-

точник находился на расстоянии $0,1\lambda$ перед рельефом аксикона, внутри подложки, которая занимает всё пространство ниже рельефа (рис. 2) до PML слоя. Показатель преломления элемента равен $n = 1,5$. В этом случае высота микрорельефа составляет:

$$h = \frac{\lambda}{2(n-1)} = \lambda. \tag{3}$$

Таким образом, рельеф элемента заканчивается на расстоянии $1,1\lambda$ от источника. Расстояние от края микрорельефа обозначим как z_{mr} . В табл. 1 приведены продольные картины дифракции для рассматриваемых пучков.

Таблица 1. Картины (размер $20\lambda \times 20\lambda$, негатив) продольной интенсивности при дифракции гауссовых мод с линейной поляризацией

| Тип рельефа, $y \parallel z$ | Тип пучка | $r_l = 0,25\lambda$ | $r_l = 0,5\lambda$ | $r_l = \lambda$ |
|------------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| Выступ | Гауссова мода | | | |
| | Мода Гаусса-Лагерра (0,1) | | | |
| Углубление | Гауссова мода | | | |
| | Мода Гаусса-Лагерра (0,1) | | | |

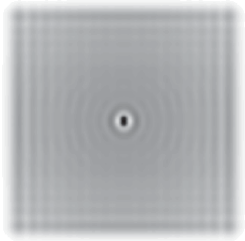

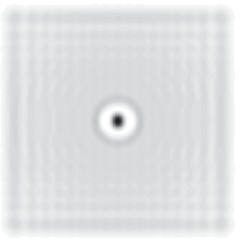
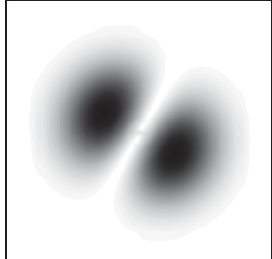
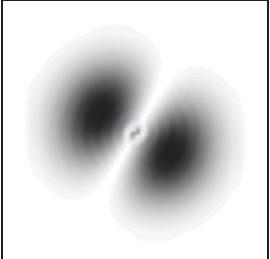
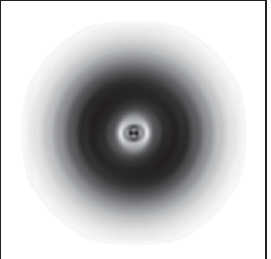
Как видно из табл. 1, в случае Гауссова пучка наблюдается сильное отличие в формировании дифракционной картины различными типами рельефа: главной особенностью дифракции на углублении является осцилляция интенсивности на оптической оси вне зависимости от размера центральной зоны. Стоит отметить увеличение периода колебаний при увеличении расстояния от оптического микроэлемента. В случае внесения в пучок вихревой фазовой сингулярности, что достигается использованием в качестве падающего пучка моды Гаусса – Лагерра (0,1), дифракционная картина изменяется только в случае $r_l = \lambda$, когда для выступа в ближней зоне дифракции происходит фокусировка.

Поперечные картины дифракции в плоскостях максимальной интенсивности для выступа показаны в табл. 2. Как вид-

но, фокусировка происходит только для Гауссова пучка, причём наиболее компактное световое пятно было получено при $r_l = 0,5\lambda$ (горизонтальный размер по полуспаду от максимума интенсивности $FWHM(-) = 0,47\lambda$). Для $r_l = 0,25\lambda$ максимум формировался внутри оптического элемента.

Для вихревого пучка фокусировка происходит только при $r_l = \lambda$, когда размер центральной зоны стал превышать теневую область освещающего пучка. В случае меньшего размера центральной зоны наблюдается преобразование вихревой фазовой зависимости в линейную, т.е. фактически преобразование моды Гаусса-Лагерра в моду Гаусса-Эрмита (нижняя строка в табл. 2). Этот эффект более детально будет рассмотрен в третьем разделе.

Таблица 2. Картины (размер $23\lambda \times 23\lambda$, негатив) поперечной интенсивности в плоскостях максимальной интенсивности для цилиндрического выступа

| Тип пучка, $y\vec{v}z$ | $r_l = 0,25\lambda$ | $r_l = 0,5\lambda$ | $r_l = \lambda$ |
|---------------------------|--|---|--|
| Гауссова мода |  <p>$FWHM(\parallel) = 0,85\lambda,$ $FWHM(-) = 0,51\lambda,$ $z_{mr} = -0,02\lambda$ (внутри элемента).</p> |  <p>$FWHM(\parallel) = 0,87\lambda,$ $FWHM(-) = 0,47\lambda,$ $z_{mr} = 0,03\lambda$</p> |  <p>$FWHM(\parallel) = 0,94\lambda,$ $FWHM(-) = 0,73\lambda,$ $z_{mr} = 0,57\lambda$</p> |
| мода Гаусса-Лагерра (0,1) |  <p>$z_{mr} = 0,03\lambda$</p> |  <p>$z_{mr} = 0,03\lambda$</p> |  <p>$FWHM(\parallel) = 1,65\lambda,$ $FWHM(-) = 1,99\lambda,$ $z_{mr} = 0,09\lambda$</p> |

2. Сравнение формирования продольного компонента электрического поля при дифракции различных пучков на выступе и углублении

Известно, что при использовании оптических систем с высокой числовой апертурой значительная доля энергии в фокальной области идёт на формирование продольного компонента (z -компонента) электрического поля [10, 12]. Аналогичный эффект достигается при использовании дифракционных аксиконов с периодом, близким к длине волны [11, 13, 15], а также более простых фокусирующих элементов [9]. В работе [9] было показано, что при дифракции Гауссова пучка на цилиндрическом выступе субволнового радиуса z -компонент электрического поля формируется вне оптической оси. Причём энергия сосредоточена в ближней зоне и быстро затухает при удалении от элемента

(первая строка табл. 3). Однако в случае дифракции на субволновом углублении распределение интенсивности продольного компонента выглядит как протяжённая световая трубка (третья строка табл. 3). Это связано с малым количеством энергии, распределённым в z -компоненте, что означает слабую степень фокусировки канавки по сравнению с выступом.

В табл. 3 также показано распределение интенсивности продольного компонента при внесении в пучок вихревой фазовой зависимости, т.е. при освещении оптического элемента модой Гаусса – Лагерра (0,1). В этом случае продольный компонент должен формироваться на оптической оси [10, 12]. Сравнение картин во второй и четвёртой строках табл. 3 подтверждает возможность концентрации значительной энергии в продольном компоненте только при использовании микрорельефа с выступом.

Таблица 3. Картины (размер $23\lambda \times 23\lambda$, негатив) продольной интенсивности z -компонента при дифракции гауссовых мод с линейной поляризацией

| Тип рельефа, $xy \parallel z$ | Тип пучка | $r_l = 0,25\lambda$ | $r_l = 0,5\lambda$ | $r_l = \lambda$ |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| Выступ | Гауссова мода | | | |
| | Мода Гаусса-Лагерра (0,1) | | | |
| Углубление | Гауссова мода | | | |
| | Мода Гаусса-Лагерра (0,1) | | | |

В табл. 4 приведены поперечные сечения в плоскостях максимальной интенсивности при дифракции на выступе для продольного компонента электрического поля. Как видно из сравнения результатов, внесение вихревой фазовой сингулярности позволяет локализовать продольный

компонент в центральной части фокальной плоскости. При этом наименьшее по размеру фокальное пятно получено при $r_l = \lambda$ ($FWHM(\parallel) = 0,36\lambda$), что меньше, чем было получено для дифракционного аксиона с предельной числовой апертурой [15].

Таблица 4. Поперечные картины (размер $11,5\lambda \times 11,5\lambda$, негатив) интенсивности z-компонента в плоскостях максимальной интенсивности для цилиндрического выступа

| Тип пучка, $y \parallel z$ | $r_l = 0,25\lambda$ | $r_l = 0,5\lambda$ | $r_l = \lambda$ |
|----------------------------|--|--|--|
| Гауссова мода | | | |
| мода Гаусса-Лагерра (0,1) | $FWHM(\parallel) = 0,46\lambda,$ $FWHM(-) = 0,59\lambda,$ $z_{mr} = 0,03\lambda$ | $FWHM(\parallel) = 0,37\lambda,$ $FWHM(-) = 0,68\lambda,$ $z_{mr} = 0,03\lambda$ | $FWHM(\parallel) = 0,36\lambda,$ $FWHM(-) = 0,68\lambda,$ $z_{mr} = 0,09\lambda$ |

3. Сравнение дифракции на субволновом выступе и углублении для вихревой моды с различным типом поляризации

Как было показано ранее, при субволновых размерах деталей микрорельефа наблюдается преобразование вихревой фазовой зависимости в линейную, т.е. фактически преобразование моды Гаусса-Лагерра в моду Гаусса-Эрмита. Рассмотрим более подробно этот эффект.

В табл. 5 и 6 приведены результаты моделирования дифракции вихревого пучка с различной поляризацией на выступе и углублении радиусом $r_l = 0,5\lambda$. Для детальной визуализации в таблицах приведены поперечные распределения интенсивности для различных компонентов электрического поля.

В табл. 5 показана дифракция вихревого гауссова пучка с линейной u-поляризацией на выступе и углублении. Видно, что в этом случае основная энер-

гия содержится в u-компоненте электрического поля. Из сравнения первой и второй строк табл. 5 обнаруживается вращение сформированной моды Гаусса-Эрмита при увеличении расстояния от оптического элемента. Одновременно уменьшается доля энергии в z-компоненте. Из сравнения первой и третьей строк можно сделать вывод, что действие выступа и углубления на поперечные компоненты электрического поля одинаковые, но фокусирующие свойства углубления значительно хуже, что сказывается на слабой выраженности z-компонента.

В табл. 6 показана дифракция вихревого гауссова пучка с различными типами поляризации на выступе радиусом $r_l = 0,5\lambda$. Поперечные распределения интенсивности для различных компонентов электрического поля приведены в плоскости максимизации энергии на оптической оси ($z_{mr} = 0,03\lambda$), т.е. фактически в плоско-

сти фокусировки продольного компонента.

Хорошо видно, что в зависимости от типа поляризации основная энергия распределяется по соответствующим компонентам электрического поля. Причём в случае линейной поляризации независимо

от поворота плоскости поляризации наблюдается преобразование вихревого пучка Гаусса-Лагерра в моду Гаусса-Эрмита, а при круговой поляризации круговая симметрия падающего пучка при дифракции не нарушается.

Таблица 5. Поперечные картины (размер $23\lambda \times 23\lambda$, негатив) интенсивности различных компонентов электрического поля при дифракции вихревого гауссова пучка с линейной у-поляризацией на выступе и углублении радиусом $r_1 = 0,5\lambda$

| тип элемента | Общая интенсивность | Компонент x | Компонент y | Компонент z |
|--------------------------------------|---------------------|---|-------------|--|
| выступ $z_{mr} = 0,03\lambda$ | | FWHM(73°) = 0,38λ FWHM(163°) = 0,83λ | | FWHM(-) = 0,68λ FWHM(0) = 0,37λ |
| выступ $z_{mr} = 1,25\lambda$ | | | | FWHM(-) = 1,87λ FWHM(0) = 1,21λ |
| углубление $z_{mr} = 0,03\lambda$ | | | | |

Заметим, что направление круговой поляризации является важным при использовании вихревых пучков [16, 17]. Как видно из сравнения третьей и четвертой строк табл. 6, при различном направлении круговой поляризации и вихревой фазы (третья строка) энергия продольного компонента (последний столбец) концентрируется на оптической оси, а при совпадении направлений (четвертая строка) распределение интенсивности z-

компонента выглядит как световое кольцо субволнового радиуса. Данный факт необходимо учитывать при использовании оптических ловушек, предназначенных для трёхмерного ориентирования молекул [18]. Сечения интенсивности продольного компонента при дифракции вихревого пучка с различным направлением круговой поляризации приведены на рис. 3.

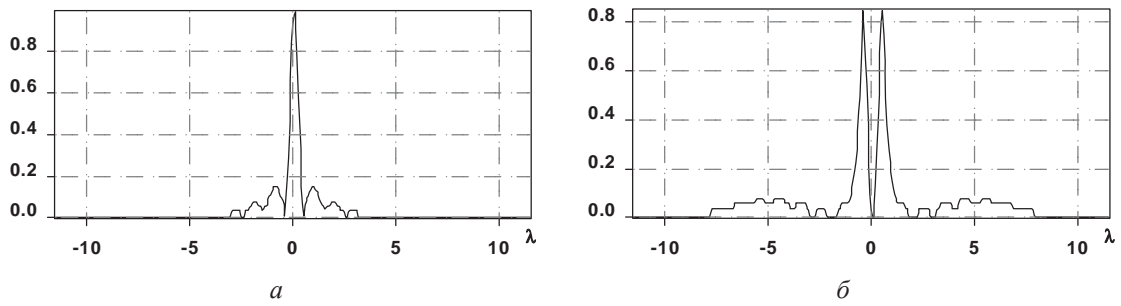


Рис. 3. Сечения интенсивности продольного компонента при дифракции вихревого пучка с круговой + (а) и круговой – (б) поляризацией на выступе радиусом $r_1 = 0,5\lambda$

Таблица 6. Поперечные картины (размер $23\lambda \times 23\lambda$, негатив) интенсивности различных компонентов электрического поля при дифракции вихревого гауссова пучка с различной поляризацией на выступе радиусом $r_1 = 0,5\lambda$ в плоскости $zmg = 0,03\lambda$

| Поляризация | Общая интенсивность | Компонент x | Компонент y | Компонент z |
|------------------|---------------------|-------------|--|---|
| x – поляризация | | | FWHM(-) = 0,36λ FWHM(0) = 0,71λ | FWHM(-) = 0,37λ FWHM(0) = 0,70λ |
| xу – поляризация | | | | FWHM(45°) = 0,39λ FWHM(135°) = 0,63λ |
| круговая «+» | FWHM = 0,70λ | | | FWHM = 0,45λ |
| круговая «-» | | | | |

Заключение

Методом решения уравнений Максвелла конечными разностями во временной области проведено моделирование дифракции однородно-поляризованных гауссовых пучков на отдельном выступе и углублении субволнового размера. Численно показано, что картина дифракции в этом случае существенно отличается: выступ демонстрирует более значительные фокусирующие свойства. Данный эффект необходимо учитывать при выборе метода травления (позитивный или негативный) для получения микрорельефа.

При дифракции на отдельном выступе излучения с вихревой зависимостью фазы наблюдается значительная концентрация энергии в продольном компоненте электрического поля в ближней зоне. Причём плоскость фокуса находится за границей оптического элемента даже при радиусе центральной зоны $\lambda/4$. Минимальное значение поперечного размера светового пятна продольного компонента, формируемого вихревым пучком с линейной поляризацией, было получено при радиусе цилиндрического выступа λ и равнялось по уровню полуспада интенсивности $\text{FWHM}=0,36\lambda$.

В случае субволнового радиуса выступа или углубления при линейной поля-

ризации было обнаружено преобразование вихревой фазовой зависимости падающего пучка в линейную, т.е. фактически преобразование моды Гаусса-Лагерра в моду Гаусса-Эрмита. Причём при удалении от оптического элемента наблюдается вращение общей картины интенсивности. Данный эффект не зависит от поворота плоскости линейной поляризации и типа рельефа (углубление или выступ).

При круговой поляризации падающего пучка осевая симметрия структуры падающего вихревого пучка при дифракции на существенно субволновых деталях микрорельефа не нарушается. Однако в зависимости от совпадения или различия направлении поляризации и вихревой фазы энергия продольного компонента концентрируется либо в световое кольцо, либо световое пятно субволнового радиуса. Данный факт необходимо учитывать при использовании оптических ловушек, предназначенных для трёхмерного ориентирования молекул.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ 13-07-00266, 13-07-97004-р_поволжье_a и 14-07-31079 мол_a) и Министерства образования и науки Российской Федерации.

Библиографический список

1. Levenson M.D. Using destructive optical interference in semiconductor lithography // *OPN*. April 2006. P. 31-35.
2. Возобова Н.Д., Денисюк И.Ю. Оптические методы формирования микроэлементов информационных систем. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. 82 с.
3. Artl J. and Padgett M.J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam // *Opt. Lett.* 2000. V. 25. P. 191-193.
4. Khonina S.N., Balalayev S.A., Skidanov R.V., Kotlyar V.V., Paivanranta B., Turunen J. Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2009. V. 11. P. 065702-065709.
5. Тычинский В.П. Сверхразрешение и сингулярности в фазовых изображениях. // *Успехи физических наук*. 2008. Т. 178, № 11. С. 1205-1214.
6. Wang W., Ishii N., Hanson S.G., Miyamoto Y. and Takeda M. Phase singularities in analytic signal of white-light speckle pattern with application to micro-displacement measurement // *Opt. Commun.* 2005. V. 248. P. 59-68.
7. Wang W., Yokozeki T., Ishijima R., Wada A., Miyamoto Y. and Mitsuo Takeda. Optical vortex metrology for nano-

metric speckle displacement measurement // Opt. Express. 2006. V. 14, is. 1). P. 120-127.

8. Angelsky O.V., Burkovets D.N., Maksimyak P.P., Hanson S.G. Applicability of the singular-optics concept for diagnostics of random and fractal rough surfaces // Applied Optics. 2003. V. 42, no. 22. P.4529-4540.

9. Хонина С.Н., Савельев Д.А., Устинов А.В. Острая фокусировка лазерного излучения с помощью двухзонного аксиального микроэлемента // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37, № 2. С. 160-169.

10. Khonina S.N., Volotovskiy S.G. Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures // J. Opt. Soc. Am. A. 2010. V. 27, is. 10. P. 2188-2197.

11. Хонина С.Н., Нестеренко Д.В., Морозов А.А., Скиданов Р.В., Пустовой И.А. Экспериментальное исследование дифракции линейно-поляризованного гауссова пучка на бинарных микроаксиконах с периодом, близким к длине волны // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35, № 1. С. 11-21.

12. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Volotovskiy S.G. Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system // Journal of Modern Optics. 2011. V. 58, is. 9. P. 748-760.

13. Хонина С.Н., Савельев Д.А., Серафимович П.Г., Пустовой И.А. Дифрак-

ция на бинарных микроаксиконах в ближней зоне // Оптический журнал. 2012. Т. 79(10). С. 22-29.

14. Oskooi A.F., Roundy D., Ibanescu M., Bermel P., Joannopoulos J.D., Johnson S.G. Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method // Computer Physics Communications. 2010. V. 181. P. 687-702.

15. Савельев Д.А., Хонина С.Н. Максимизация продольной электрической компоненты при дифракции на бинарном аксиконе линейно-поляризованного излучения // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36, № 4. С. 511-517.

16. Khonina S.N. Simple phase optical elements for narrowing of a focal spot in high-numerical-aperture conditions // Optical Engineering. 2013. V. 52(9). Art. no. 091711 (7 p.)

17. Khonina S.N., Karpeev S.V., Alferov S.V., Savelyev D.A., Laukkanen J., Turunen J. Experimental demonstration of the generation of the longitudinal E-field component on the optical axis with high-numerical-aperture binary axicons illuminated by linearly and circularly polarized beams // J. Opt.. 2013. V. 15. Art. no. 085704 (9pp).

18. Dedecker P., Muls B., Hofkens J., Enderlein J., Hotta J.-I. Orientational effects in the excitation and de-excitation of single molecules interacting with donut-mode laser beams // Opt. Express. 2007. V. 15. P. 3372-3383.

Информация об авторах

Савельев Дмитрий Андреевич, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: dmityrey.savelyev@yandex.ru. Область научных интересов: оптическая и цифровая обработка изображений, дифракционная оптика, сингулярная оптика.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. E-mail: khonina@smr.ru. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений.

INFLUENCE OF SUBWAVE DETAILS OF MICRORELIEF ON THE DIFFRACTION PATTERN OF GAUSSIAN BEAMS

© 2014 D. A. Savelyev¹, S. N. Khonina²

¹Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

²Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russian Federation

The paper deals with the influence of subwavelength details with two types of etching of microrelief (ridge and groove) on the diffraction pattern. Modeling the diffraction of uniform-polarization radiation corresponding to both a Gaussian beam and a vortical Gaussian-Laguerre beam is performed by the method of solving Maxwell equations by finite differences in time domain (FDTD). The characteristics and features of the diffraction pattern in the near zone, including those connected with the formation of the longitudinal component of the electric field are determined.

Positive and negative relief, Gaussian beams, beams with a vortical phase, FDTD, Meep, uniform polarization, π -jump of a phase.

References

1. Levenson M.D. Using destructive optical interference in semiconductor lithography // OPN. April 2006. P. 31-35.
2. Vozobova N.D., Denysiuk I.Y. Opticheskie metody formirovaniya mikroelementov informatsionnykh system [Optical methods for the formation of microelements of information systems]. St. P.: St. P. ITMO Publ., 2008. 82 p.
3. Artl J. and Padgett M.J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam // Opt. Lett. 2000. V. 25. P. 191-193.
4. Khonina S.N., Balalayev S.A., Skidanov R.V., Kotlyar V.V., Paivanranta B., Turunen J. Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2009. V. 11. P. 065702-065709.
5. Tychinskii V.P. Superresolution and singularities in phase images // Advances in Physical Sciences. 2008. V. 178(11). P.1205-1214 (In Russ.).
6. Wang W., Ishii N., Hanson S.G., Miyamoto Y. and Takeda M. Phase singularities in analytic signal of white-light speckle pattern with application to microdisplacement measurement // Opt. Commun. 2005. V. 248. P. 59-68.
7. Wang W., Yokozeki T., Ishijima R., Wada A., Miyamoto Y. and Mitsuo Takeda. Optical vortex metrology for nanometric speckle displacement measurement // Opt. Express. 2006. V. 14, is. 1. P. 120-127.
8. Angelsky O.V., Burkovets D.N., Maksimyak P.P., Hanson S.G. Applicability of the singular-optics concept for diagnostics of random and fractal rough surfaces // Applied Optics. 2003. V. 42, no. 22. P.4529-4540.
9. Khonina S.N., Savelyev D.A., Ustinov A.V. Diffraction of laser beam on a two-zone cylindrical microelement // Computer Optics. 2013. V. 37, no. 2. P. 160-169 (In Russ.).
10. Khonina S.N., Volotovskiy S.G. Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures // J. Opt. Soc. Am. A. 2010. V. 27, is. 10. P. 2188-2197.
11. Khonina S.N., Nesterenko D.V., Morozov A.A., Skidanov R.V., Pustovoy I.A. Experimental research of diffraction of an linearly-polarized Gaussian beam by binary microaxicon with the period close to wavelength // Computer Optics. 2011. V. 35, no. 1. P. 11-21. (In Russ.).
12. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Volotovskiy S.G. Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system // Journal of

Modern Optics. 2011. V. 58, is. 9. P. 748-760.

13. Khonina S.N., Savelyev D.A., Serafimovich P.G., Pustovoy I.A. Diffraction on binary micro-axicons in a near zone // Journal of Optical Technology. 2012. V. 79(10). P. 626-631.

14. Oskooi A.F., Roundy D., Ibanescu M., Bermel P., Joannopoulos J.D., Johnson S.G. Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method // Computer Physics Communications. 2010. V. 181. P. 687-702.

15. Savelyev D.A., Khonina S.N. Maximising the longitudinal electric component at diffraction on a binary axicon linearly polarized radiation // Computer Optics. 2012. V. 36, no. 4. P. 511-517 (In Russ.).

16. Khonina S.N. Simple phase optical elements for narrowing of a focal spot in high-numerical-aperture conditions // Optical Engineering. 2013. V. 52(9). Art. no. 091711 (7 p.)

17. Khonina S.N., Karpeev S.V., Alferov S.V., Savelyev D.A., Laukkanen J., Turunen J. Experimental demonstration of the generation of the longitudinal E-field component on the optical axis with high-numerical-aperture binary axicons illuminated by linearly and circularly polarized beams // J. Opt. 2013. V. 15. Art. no. 085704 (9 p.).

18. Dedecker P., Muls B., Hofkens J., Enderlein J., Hotta J.-I. Orientational effects in the excitation and de-excitation of single molecules interacting with donut-mode laser beams // Opt. Express. 2007. V. 15. P. 3372–3383.

About the authors

Savelyev Dmitry Andreevich, post-graduate student, Samara State Aerospace University. E-mail: dmityrey.savelyev@yandex.ru. Area of research: optical and digital image processing, diffractive optics, singular optics.

Khonina Svetlana Nikolaevna, Doctor of Physics and Mathematics; Professor, Leading Researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. E-mail: khonina@smr.ru. Area of research: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing.

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени академика С. П. КОРОЛЁВА
(национального исследовательского университета)

№ 1 (43)

2014

Корректоры: **Н. С. Куприянова, Т. К. Крестина, Ю. Н. Литвинова**
Компьютерная вёрстка **Т. А. Ефимова**
Переводчик **Е. И. Безрукова**

Каталожная цена: 1000 руб.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 36,5
Тираж 200. Заказ

Отпечатано в издательстве СГАУ
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

**Правила оформления статей для журнала
"Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени
академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета)"**

1. Статья представляется в двух экземплярах, распечатанных на лазерном принтере с одной стороны листа формата А4 в режиме качественной печати, а также в электронном виде на отдельном носителе (CD, DVD). Каждый экземпляр должен быть подписан всеми авторами и вместе с комплектом документов (см. п. 7) отправлен на адрес редакции журнала «Вестник СГАУ»: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, СГАУ, ком. 212а, корп. 3А. Тел.: (846) 267-48-41; e-mail: vest@ssau.ru.

2. Текст статьи представляется в формате Microsoft Word, подготовленный по следующим требованиям:

- объём статьи – до 10 страниц формата А4;
- поля текста – по 2,5 см с каждой стороны;
- шрифты – Times New Roman, Symbol;
- междустрочный интервал – одинарный;
- отступ первой строки абзаца – 1 см;
- выравнивание – по ширине страницы;
- страницы должны быть пронумерованы.

Имя файла определяется по фамилии первого автора: **Иванов.doc**.

Замена буквы «ё» на букву «е» в тексте недопустима.

3. Допускается наличие рисунков, формул и таблиц по тексту.

3.1. Рисунки размещаются как в самом тексте статьи, так и в отдельных файлах. Рисунки могут быть созданы средствами Microsoft Word/Excel или представлены в форматах JPEG, GIF, TIFF, PNG.

Подпись к рисунку начинается со слова «Рис.» и номера по порядку; располагается под рисунком, выравнивание – по центру, курсив, кегль – 10 пт. Для ссылки на рисунок по тексту статьи следует использовать сокращение, например, рис. 1.

3.2. Для набора математических выражений и формул следует использовать Microsoft Equation 3.0 (и выше) или MathType по следующим требованиям:

- буквы латинского алфавита - Times New Roman; курсив, кегль 12 пт;
- буквы греческого алфавита - Symbol; курсив, кегль 12 пт;

Все специальные символы в тексте статьи должны выполняться в математическом редакторе. **Не допускается применение в тексте вставных символов Microsoft Word при наборе математических выражений и формул.**

Формулы следует печатать с новой строки; нумерация формул осуществляется в порядке следования по тексту статьи. Нумеровать следует только формулы, на которые в тексте делаются ссылки. Номер формулы и ссылка на неё в тексте обозначается числом в круглых скобках: (1), (2), (3). Допускается разбивка длинных формул на строки; длина формулы в строке строго ограничена – 80 мм.

3.3. Заголовок таблицы начинается со слова «Таблица» и номера по порядку; располагается над таблицей, выравнивание – по левому краю, кегль – 10 пт. Для ссылки на таблицу по тексту статьи следует использовать сокращение, например, табл. 1.

Обязательно наличие подрисуночных подписей и подписей к таблицам.

4. Аннотация к статье (на русском и английском языках) должна быть информативной (не содержать общих слов), содержательной (отражать основное

содержание статьи и результаты исследований), структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Авторское резюме должно описывать основные цели исследования; объяснить методику проведения исследования (без методологических деталей); суммировать наиболее важные результаты и их важность. Рекомендуемый объем аннотации – 150-250 слов.

Аннотация не должна содержать ссылок на литературу и аббревиатуры (если возможно).

Аннотация на английском языке должна содержать англоязычную специальную терминологию по тематике публикации.

5. Библиографический список приводится на русском и английском языках отдельными списками. Требования к оформлению библиографических ссылок учитывают правила ГОСТ 7.0.5-2008.

Литературные источники располагаются в порядке их использования по тексту статьи в виде нумерованного списка. Ссылки на литературные источники в тексте приводятся в квадратных скобках и отделяются запятыми или тире, например, [1-3], [1,2,5].

5.1. Библиографический список на английском языке (References) должен полностью повторять структуру русскоязычного списка. Рекомендуемая схема описания русскоязычных публикаций на английском языке:

- авторы (транслитерация);
- перевод заглавия статьи на английский язык (для русскоязычных книг и монографий название приводится в транслитерации, далее перевод на английский язык в квадратных скобках);
- название русскоязычного источника (транслитерация или английский вариант, если таковой имеется);
- перевод названия источника на английский язык в квадратных скобках (для журналов можно не делать);
- выходные данные с обозначениями на английском языке (том – V., № – no., C. – P.);
- указание на язык статьи (In Russ.) после описания статьи.

5.2. Если русскоязычная публикация имеет переводной вариант (на английском языке), то в английской части библиографии приводятся переводные данные публикации.

5.3. Включение в библиографический список неопубликованных материалов не допускается.

6. В каждой статье должны быть указаны следующие данные **на русском и английском языках** (по структуре оформления рукописи):

- УДК (при необходимости MSC);
- название статьи (12 пт, все буквы прописные жирное начертание);
- инициалы, фамилия автора(ов) (12 пт);
- название организации, город, страна;
- аннотация (10 пт);
- ключевые слова (каждое ключевое слово или словосочетание отделяется от другого запятой или точкой с запятой) (10 пт, курсив);
- текст статьи (12 пт) (допускается разбиение текста на разделы: Введение, ..., Заключение);
- библиографический список (References) (заголовки 12 пт, жирное начертание);
- информация об авторах: учёная степень, учёное звание, должность (с указанием подразделения), организация; электронная почта (e-mail); область научных интересов.

6.1. Если авторы работают в разных организациях, то принадлежность указывается с помощью надстрочного знака: ^{1, 2}. Если авторы работают в одной организации, оцифровка индексами фамилий и организации не требуется.

6.2. Англоязычный блок, содержащий название статьи, ФИО авторов, наименование организации, аннотацию, ключевые слова, библиографический список, информацию об авторах, приводится отдельным разделом после информации об авторах на русском языке.

7. К тексту статьи прилагается комплект сопроводительных документов:

- направление организации (если авторы не являются сотрудниками СГАУ) на фирменном бланке, подписанное её руководителем или заместителем по научной работе, заверенное печатью;
- отзыв специалиста по научному направлению статьи (не являющегося сотрудником подразделения, где работают авторы));
- акт экспертизы о возможности опубликования в открытой печати;
- контактная информация: фамилия, имя, отчество (полностью) на каждого автора; адрес для переписки и телефон (не публикуются в журнале).

8. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и сопроводительные документы не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.

9. При подготовке аннотации и оформлении библиографического списка на английском языке рекомендуется использовать следующие методические материалы:

Кириллова О.В. Редакционная подготовка научных журналов по международным стандартам. М., 2013. 90 с.,

(http://shkola.neicon.ru/images/documents/1_kirillovaredprep_2013.pdf)

- раздел 3.3 – «Авторское резюме и ключевые слова на английском языке»;
- раздел 3.4 – «Списки литературы в латинице - References».

УДК 535.42

ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОВЫХ ШАРОВ НА ОСНОВЕ ВСТРЕЧНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ОСТРОСФОКУСИРОВАННЫХ ПУЧКОВ С РАЗЛИЧНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

© 2013 С. Н. Хонина, А. В. Устинов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрено формирование сферических распределений интенсивности на основе встречной интерференции острогофокусированных вихревых пучков с различной поляризацией. Формирование трёхмерных распределений осуществляется простым способом с помощью оптимизации ширины и положения одной кольцевой диафрагмы. Для узкой диафрагмы оптимальные параметры вычисляются аналитически, а для широкой диафрагмы – дополнительно численно корректируются. Показано, что в зависимости от поляризации, порядка вихревой сингулярности и дополнительного фазового набег в одном из пучков можно формировать как цельные, так и полые световые шары субволнового радиуса, состоящие из различных компонентов электрического поля.

(Текст аннотации)

Острая фокусировка, встречная интерференция, трёхмерное субволновое распределение интенсивности, поляризация, вихревая фазовая функция.

Формирование заданных трёхмерных распределений интенсивности острогофокусированного лазерного излучения актуально в задачах оптического захвата и манипулирования, микроскопии и записи данных.

(Текст статьи)

Библиографический список

1. Хонина С.Н., Вологовский С.Г. Управление вкладом компонент векторного электрического поля в фокусе высокоапертурной линзы с помощью бинарных фазовых структур // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, №1. С. 58-68.
2. Хонина С.Н., Устинов А.В. Формирование тонкой световой трубки при острой фокусировке азимутально-поляризованного излучения // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14, № 6. С. 279-284.
3. Sheppard C.J.R., Gong W., Si K. Polarization effects in 4Pi microscopy. // Micron. – 2011. V. 42. P. 353–359.
4. ...

Информация об авторах

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической кибернетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: khonina@smr.ru. Область научных интересов: сингулярная оптика, дифракционная оптика, оптический анализ изображений.

Устинов Андрей Владимирович, аспирант кафедры технической кибернетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: andr@smr.ru. Область научных интересов: дифракционная оптика, разработка программ оптического моделирования, обработка изображений.

FORMATION OF LIGHT BALLS ON THE BASIS OF INTERFERENCE OF ONCOMING FINE-FOCUSED BEAMS WITH DIFFERENT POLARIZATIONS

© 2013 S. N. Khonina, A. V. Ustinov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The paper deals with the formation of spherical intensity distributions on the basis of the interference of oncoming fine-focused vortex beams with different polarization. The formation of three-dimensional distributions is accomplished in a simple way by optimizing the width and position of a single annular diaphragm. The optimum parameters are analytically estimated for a narrow ring aperture, while those for a broad diaphragm are further numerically corrected. It is shown that, depending on the polarization, the order of the vortex singularity and an additional phase advance in one of the beams both solid and hollow light balls of a subwavelength radius consisting of different components of the electric field can be formed.

(Text of abstract)

Sharp focusing, interference of oncoming beams, three-dimensional subwavelength intensity distribution, polarization, vortex phase function.

References

1. Khonina S.N., Volotovskiy S.G. Control by contribution of components of vector electric fields in focus of a high-aperture lens by means of binary phase structures. *Computer Optics*, 2010. V. 34, no. 1. P. 58-68. (In Russ.)
2. Khonina S.N., Ustinov A.V. Forming of the thin light tube at sharp focusing of azimuthally-polarized radiation. *Izv. SNC RAN*, 2012, v. 14, no 6, p. 279-284. (In Russ.)
3. Sheppard C.J.R., Gong W. Si K. Polarization effects in 4Pi microscopy. *Micron*, 2011, v. 42, p. 353–359.
4. ...

About the authors

Khonina Svetlana Nikolaevna, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Technical Cybernetics, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: khonina@smr.ru. Area of research: singular optics, diffractive optics, optical image processing.

Ustinov Andrey Vladimirovich, Postgraduate Student of the Department of Technical Cybernetics, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: andr@smr.ru. Area of research: diffractive optics, software design for optical modeling, image processing.