

ФОТОННЫЕ СТРУИ, СФОРМИРОВАННЫЕ КВАДРАТНЫМИ МИКРОСТУПЕНЬКАМИ*Котляр В.В.¹, Стафеев С.С.¹, Фельдман А.Ю.²*¹ *Институт систем обработки изображений РАН,*² *FLIR Optical Component Group***Аннотация**

Экспериментально показано, что микроступеньки с квадратным сечением на кварцевой подложке со стороной квадрата 0,4 мкм; 0,5 мкм; 0,6 мкм и 0,8 мкм и высотой 500 нм при освещении со стороны подложки линейно поляризованным лазерным светом с длиной волны $\lambda = 633$ нм формируют вблизи своей поверхности области повышенной интенсивности (фотонные струи), превышающие интенсивность падающего света почти в 6 раз и имеющие в сечении диаметры по полуспаду интенсивности $0,44\lambda$; $0,43\lambda$; $0,39\lambda$ и $0,47\lambda$, которые меньше дифракционного предела $0,51\lambda$. Причём когда сторона квадрата ступеньки меньше длины волны, фокус находится внутри ступеньки, а когда сторона квадрата больше длины волны, фокус – снаружи ступеньки, и это похоже на оптическую свечу. Сформировать фотонную струю с помощью фиксированной ступеньки на подложке удобнее, чем с помощью микросферы, которую нужно как-то удерживать. Кроме того, все на сегодня экспериментально зарегистрированные фокусные пятна для диэлектрических микросфер больше дифракционного предела.

Ключевые слова: фотонная струя, микроступенька, FDTD-метод, сканирующая ближне-польная оптическая микроскопия (СБОМ).

Введение

Фокусировка света в субволновую область является актуальной задачей нанопотоники. Примером решения такой задачи является фокусировка света с помощью диэлектрической микросферы (микрошара). Самой первой работой по субволновой фокусировке света микросферами является работа [1]. В [1] микросферы из кварца диаметром 0,5 мкм, освещаемые эксимерным KrF лазером с длиной волны 248 нм, фокусировали свет на кремниевую подложку и выплавляли в ней холмики шириной 100 нм. В [2] был предложен сходный механизм формирования микрорельефа: микросфера диаметром 1 мкм захватывалась в оптическую ловушку Бесселевым пучком с длиной волны 532 нм, перемещалась в нужную точку, затем, освещаемая импульсным лазерным излучением с длиной волны 355 нм, прожигала в подложке ямку и перемещалась далее в следующую точку. В работе [3] были проведены теоретические исследования фокусировки света микросферами. В частности, было показано, что микросфера с диаметром 1 мкм (показатель преломления $n = 1,59$), освещаемая плоской волной с длиной $\lambda = 400$ нм, формирует фокусное пятно с диаметром в плоскости, перпендикулярной направлению поляризации, равным $\text{full width at half maximum (FWHM)} = 0,325\lambda$. В [3] фокусные области, формируемые микросферами, названы фотонными наноструями. Прямое экспериментальное наблюдение фотонной наноструи было осуществлено в работе [4], где латексные микросферы диаметром 1 мкм, 3 мкм и 5 мкм, освещённые плоской волной с длиной 520 нм, формировали фокусы с диаметрами $0,62\lambda$; $0,52\lambda$ и $0,58\lambda$. Т.е. полученные экспериментально фотонные струи имели хоть и субволновый диаметр, но не демонстрировали преодоления дифракционного предела. Другая характеристика фотонной наноструи – её длина (глубина фокусировки) исследовалась в [5, 6]. В [5] численно показано, что увеличить длину фотонной наноструи

можно используя градиентную микросферу, в которой показатель преломления меняется линейно от 1,43 до 1,59, при этом глубина фокусировки $\text{DOF (depth of focus)}$ равна $11,8\lambda$. В [6] ставилась обратная задача – уменьшение длины фотонной наноструи. Для этого микросфера радиусом $2,5\lambda$ освещалась гауссовым пучком, сфокусированным широкоапертурной линзой с числовой апертурой $\text{NA} \approx 1$. Длина фотонной наноструи составила в этом случае $\text{DOF} = 0,88\lambda$. Отметим, что, помимо микросфер, известны работы по формированию фотонных наноструй другими диэлектрическими микрообъектами, например, микроцилиндрами [7] или дисками [8]. Заметим также, что применение сферы для фокусировки затруднительно, т.к. сфера должна удерживаться (например, в [2] с помощью световой ловушки). Более технологичным представляется изготовление фокусирующего элемента на подложке. Если сделать на такой подложке с обратной стороны антиотражающее покрытие, то эффективность при фокусировке будет выше, чем у микросферы соответствующего диаметра.

В данной работе рассмотрена фокусировка линейно поляризованного лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 633$ нм кварцевыми ступеньками (показатель преломления $n = 1,46$) в форме параллелепипедов с квадратным сечением и высотой 500 нм на подложке. Экспериментально показано, что такие ступеньки со стороной квадрата 0,4 мкм; 0,5 мкм; 0,6 мкм и 0,8 мкм формируют вблизи своей поверхности фокусные области в форме фотонной наноструи, превышающие интенсивность падающего света почти в 6 раз и имеющие в сечении диаметры фокусов по полуспаду интенсивности $0,44\lambda$; $0,43\lambda$; $0,39\lambda$ и $0,47\lambda$, которые меньше дифракционного предела $0,51\lambda$. Для ступеньки со стороной квадрата 0,6 мкм диаметры эллиптического фокусного пятна по полуспаду интенсивности были равны в эксперименте $\text{FWHM}_{\min} = 0,39\lambda$ и $\text{FWHM}_{\max} = 0,45\lambda$, в моделировании – $\text{FWHM}_{\min} = 0,40\lambda$

и $FWHM_{max} = 0,53\lambda$ (для поперечной составляющей интенсивности). Интенсивность в максимуме фотонной струи для ступеньки с шириной 0,6 мкм составила 6,43 от максимума интенсивности входного излучения.

1. Моделирование

Моделирование проводилось с помощью метода FDTD (finite-difference time-domain), реализованного в программе FullWAVE [9]. Размер сетки по пространству составлял 0,012 мкм, т.е. около $\lambda/53$. Моделирование проводилось для различных значений стороны квадратного сечения ступеньки из кварца (показатель преломления $n = 1,46$) L от 0,4 мкм до 0,8 мкм с шагом 0,02 мкм. Для приближения к условиям эксперимента ступенька была на подложке (рис. 1). Эти прямоугольные столбики (ступеньки) освещались линейно поляризованной плоской волной с длиной $\lambda = 633$ нм. Высота у всех ступенек была одинакова и равна $H = 500$ нм (чтобы сравнить с экспериментом).

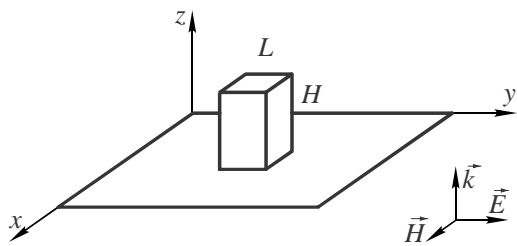


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой ступеньки

Результаты моделирования для ступенек с шириной 0,4 мкм; 0,6 мкм и 0,8 мкм приведены на рис. 2–4. На рис. 2 показано распределение интенсивности в плоскости xz , перпендикулярной поляризации входного излучения, а на рис. 3 – в плоскости yz , параллельной поляризации входного излучения. Распределение интенсивности вдоль оптической оси z приведено на рис. 4.

Из распределения интенсивности на рис. 2, 3 видно, что непосредственно за поверхностью ступеньки формируется область повышенной интенсивности, которая совпадает по своей форме с фотонными наноструями, создаваемыми с помощью микросфер. Из рис. 2, 3 также видно, что формируемая фотонная струя эллиптическая – фокус вытянут вдоль направления поляризации входного излучения за счёт присутствия в данной плоскости продольной составляющей интенсивности [10]. Из распределения интенсивности вдоль оси z (рис. 4) видно, что при малых значениях ширины ступеньки (сторона квадрата меньше длины волны) максимум интенсивности формируется внутри ступеньки вблизи её границы. Когда ширина ступеньки (сторона квадрата) равна 0,6 мкм, максимум интенсивности смещается наружу, дальнейшее увеличение ширины ступеньки приводит к увеличению фокусного расстояния (расстояния вдоль оси z от границы ступеньки до максимума интенсивности). Диаметры фокусных пятен вблизи выходной поверхности ступенек (рис. 2) со стороны квадрата 0,4 мкм; 0,5 мкм; 0,6 мкм и 0,8 мкм равны по полуспаду интенсивности (FWHM) $0,44\lambda$; $0,42\lambda$; $0,40\lambda$; $0,45\lambda$.

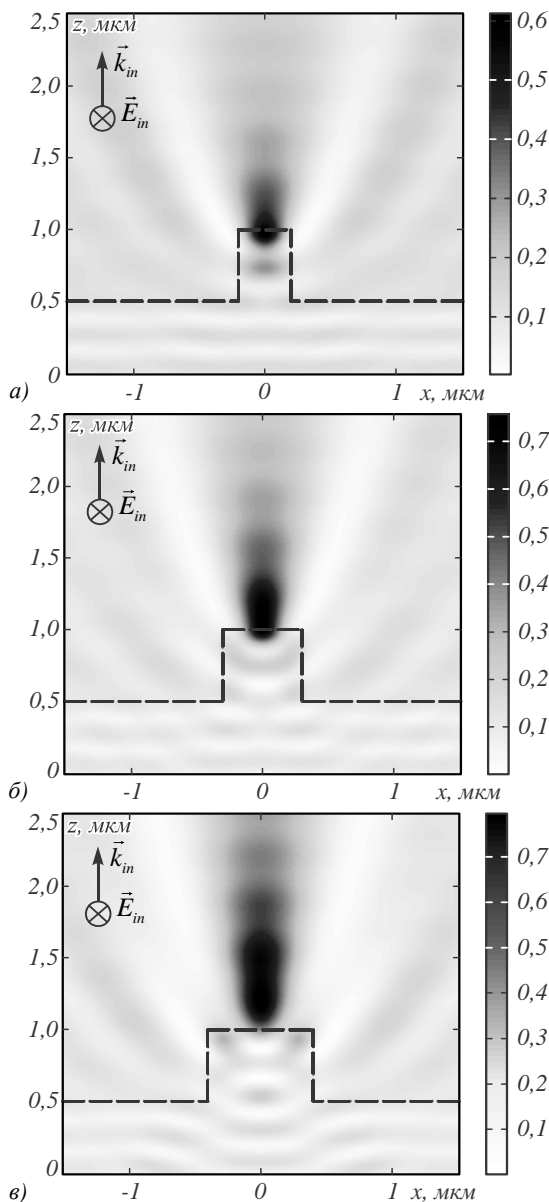


Рис. 2. Распределение интенсивности (негативное изображение) в плоскости xz для ступенек со стороной квадрата 0,4 мкм (а), 0,6 мкм (б) и 0,8 мкм (в). Пунктирной линией показаны границы элемента

Из рис. 2 видно, что внутри ступеньки имеются несколько локальных максимумов, которые похожи на основную моду ступенчатого планарного волновода.

Например, для ТЕ-поляризации (вектор электрического поля E_y направлен перпендикулярно плоскости xz) основная мода описывается выражением [11]

$$E_y = \begin{cases} \cos(\alpha x) & , |x| \leq L/2, \\ \cos(\alpha L/2) \exp[-\gamma(|x| - L/2)] & , |x| \leq L/2. \end{cases} \quad (1)$$

В (1) L – ширина волновода, параметры α и γ связаны соотношением

$$n^2 k^2 - \alpha^2 = k^2 + \gamma^2,$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, n – показатель преломления материала волновода.

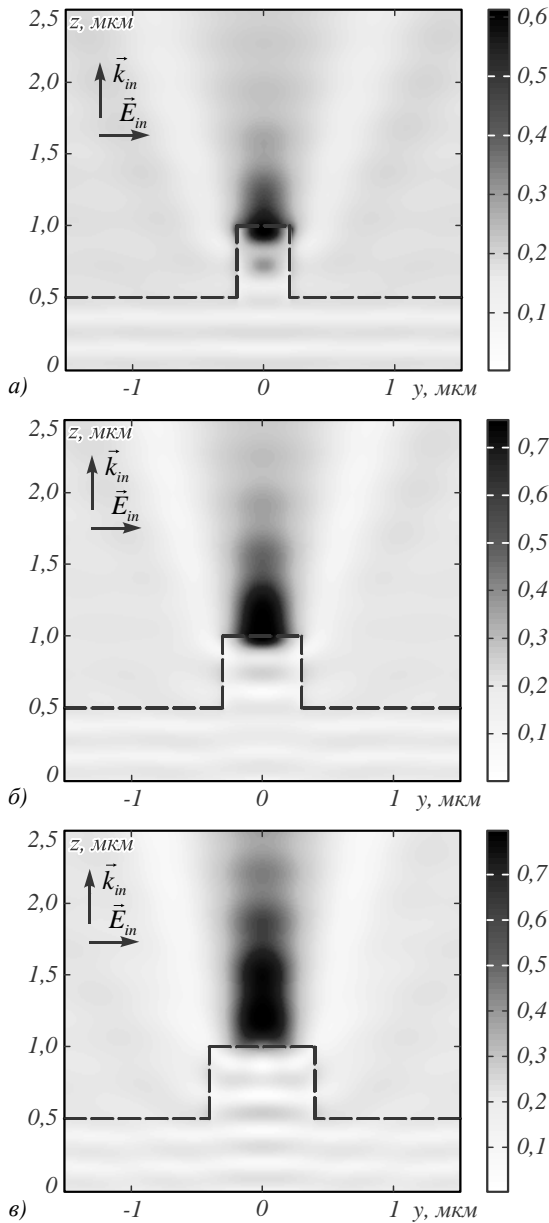


Рис. 3. Распределение интенсивности (негативное изображение) в плоскости yz для ступенек со стороны квадрата 0,4 мкм (а), 0,6 мкм (б) и 0,8 мкм (в). Пунктирной линией показаны границы элемента

Параметр α можно найти из дисперсионного соотношения $\xi \operatorname{tg} \xi = \sqrt{k_0^2 - \xi^2}$, где $k_0 = (kL/2)\sqrt{n^2 - 1}$, $\xi = \alpha L/2$. Из дисперсионного соотношения можно получить приближённо, что $\alpha \approx \pi/L$. Тогда можно оценить ширину основной моды по полуспаду интенсивности из равенства: $\cos^2(\alpha x) = \cos^2(\pi x/L) = 1/2$. Получим, что $\text{FWHM} = L/2$. Для ступенек со стороной квадрата L , равной 0,4 мкм; 0,5 мкм; 0,6 мкм и 0,8 мкм, получим размер моды по полуспаду интенсивности (FWHM) $0,32\lambda$; $0,40\lambda$; $0,47\lambda$ и $0,63\lambda$ ($\lambda = 633 \text{ нм}$). Видно, что наиболее близкое совпадение размера фокуса ($0,42\lambda$) и размера моды ($0,40\lambda$) имеет место для ступеньки с $L = 0,5 \text{ мкм}$.

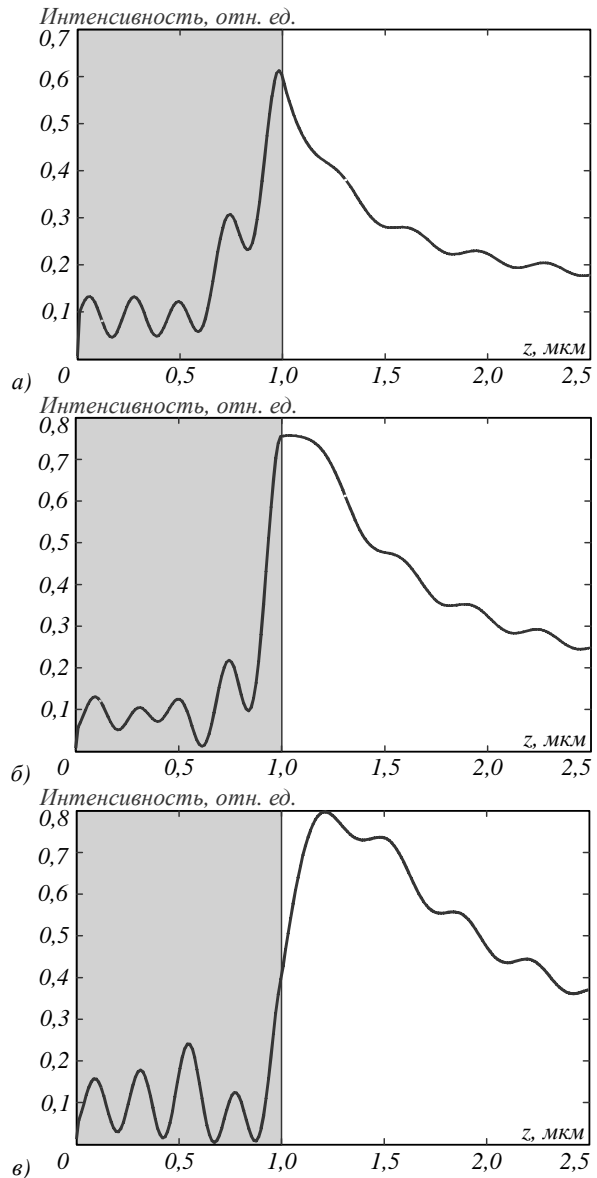


Рис. 4. Распределение интенсивности вдоль оси z для ширины ступеньки, равной 0,4 мкм (а), 0,6 мкм (б) и 0,8 мкм (в). Чёрный вертикальный отрезок показывает верхнюю плоскость ступеньки

Из рис. 2 также видно, что внутри ступеньки световое поле сходится и фокусируется вблизи выходной поверхности. На рис. 2б линии локальных максимумов внутри ступеньки вогнуты. Это можно объяснить тем, что излучение внутри ступеньки вблизи края распространяется с большей фазовой скоростью, чем излучение в центре ступеньки. А также это можно объяснить искривлением фронта нормально падающей на подложку плоской волны на краю ступеньки. Причём искривление такое, что излучение направляется внутрь ступеньки от края к центру, как это было показано в [12]. В частности, в [12] показано, что краевой луч смещается от края ступеньки к её центру по корневой параболе согласно формуле

$$\Delta x = 0,92 \sqrt{\frac{\lambda z}{n}}, \tag{2}$$

где Δx – величина смещения локального максимума внутри ступеньки. Из (2) можно оценить длину стороны квадрата ступеньки, при которой оба максимума (с левого и правого краёв ступеньки) сходятся в центре, образуя фокус при заданной высоте ступеньки H . Для этого положим в (2) $\Delta x = L/2$ и $z = H$, тогда получим:

$$L = 2 \cdot 0,92 \sqrt{\frac{\lambda H}{n}} \cong 0,86 \text{ мкм} . \quad (3)$$

На рис. 5 показана зависимость максимальной интенсивности фокуса вблизи поверхности ступеньки от ширины ступеньки L . Максимум наблюдается для ступеньки шириной $L = 0,6$ мкм. Именно для такой ступеньки максимум интенсивности (фокус) вдоль оси z (рис. 4) оказывается вне ступеньки.

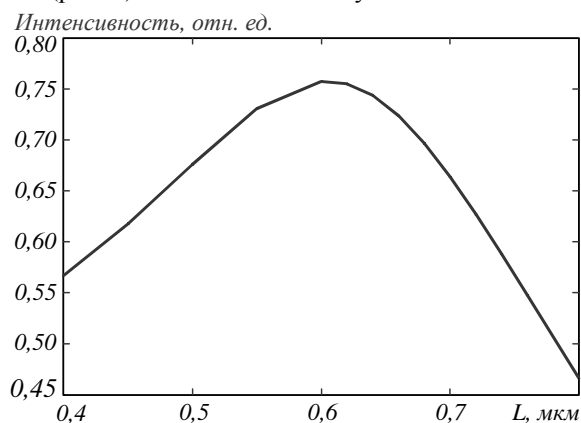


Рис. 5. Распределение максимума интенсивности вблизи поверхности ступеньки при изменении ширины ступеньки (стороны квадрата)

2. Эксперимент

Набор микропараллелепипедов с квадратным сечением разного размера и одинаковой высоты был изготовлен по технологии фотолитографии (экцимерный лазер ArF с длиной волны 193 нм) и плазменного травления подложек из плавленого кварца. На рис. 6 и 7 показаны изображения профиля изготовленных элементов, полученные на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Solver Pro. Как видно из рис. 6б и 7б, высота микрорельефа составляет примерно 500 нм.

Экспериментальное исследование осуществлялось методом СБОМ на микроскопе Ntegra Spectra (NT-MDT). Исследуемые ступеньки освещались со стороны подложки линейно поляризованным гауссовым пучком с длиной волны 633 нм, радиус перетяжки гауссова пучка составлял около 5 мкм. Гауссовый пучок фокусировался только на одну ступеньку. Исследование проводилось для столбиков со стороной квадрата 0,4 мкм; 0,5 мкм; 0,6 мкм и 0,8 мкм. Были получены распределения интенсивности в фокусах вблизи выходной поверхности ступенек.

Шаг между двумя отсчётами при измерении интенсивности составлял 0,015 нм. Поэтому погрешность определения диаметра фокусных пятен по полуспаду интенсивности в эксперименте не превышает

0,01λ. Пример распределения интенсивности, полученного со СБОМ, приведён на рис. 8.

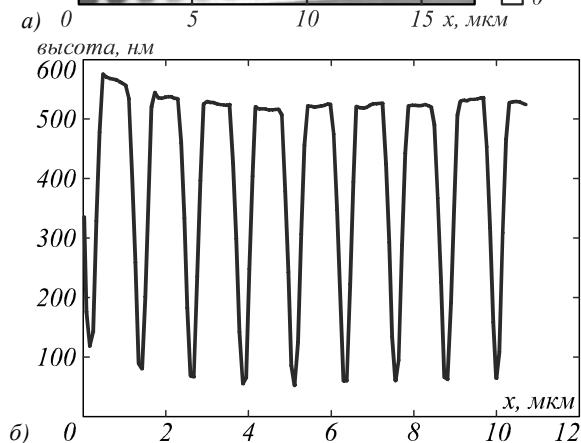
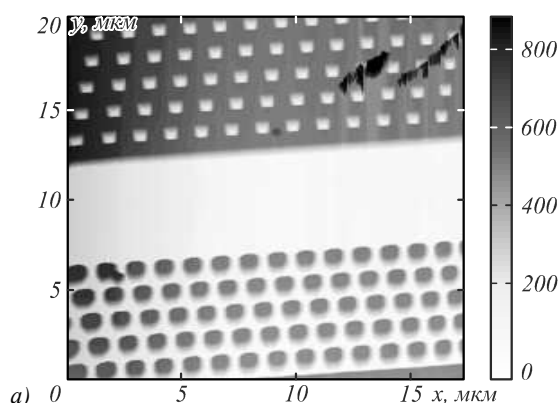


Рис. 6. АСМ изображение исследуемых микроступенек со стороны квадрата 0,6 мкм (а) и сечение нескольких из них (б)

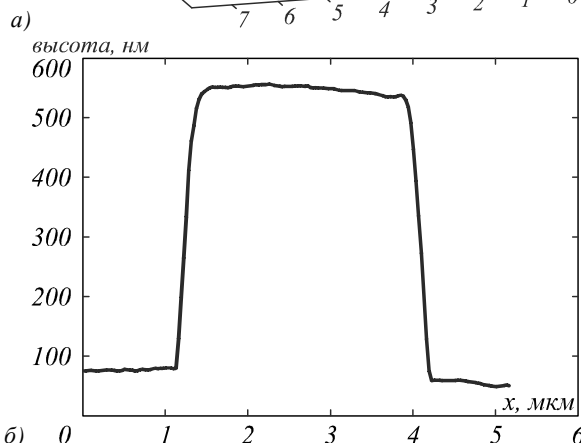
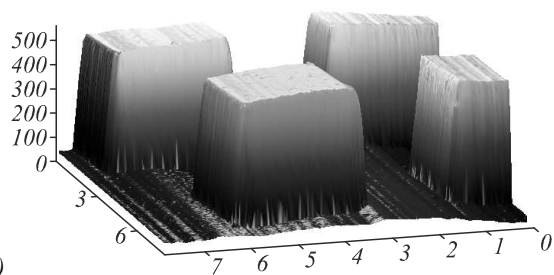


Рис. 7. АСМ изображение ступенек со стороны квадрата 2,5 мкм (а) и профиль одной из них (б)

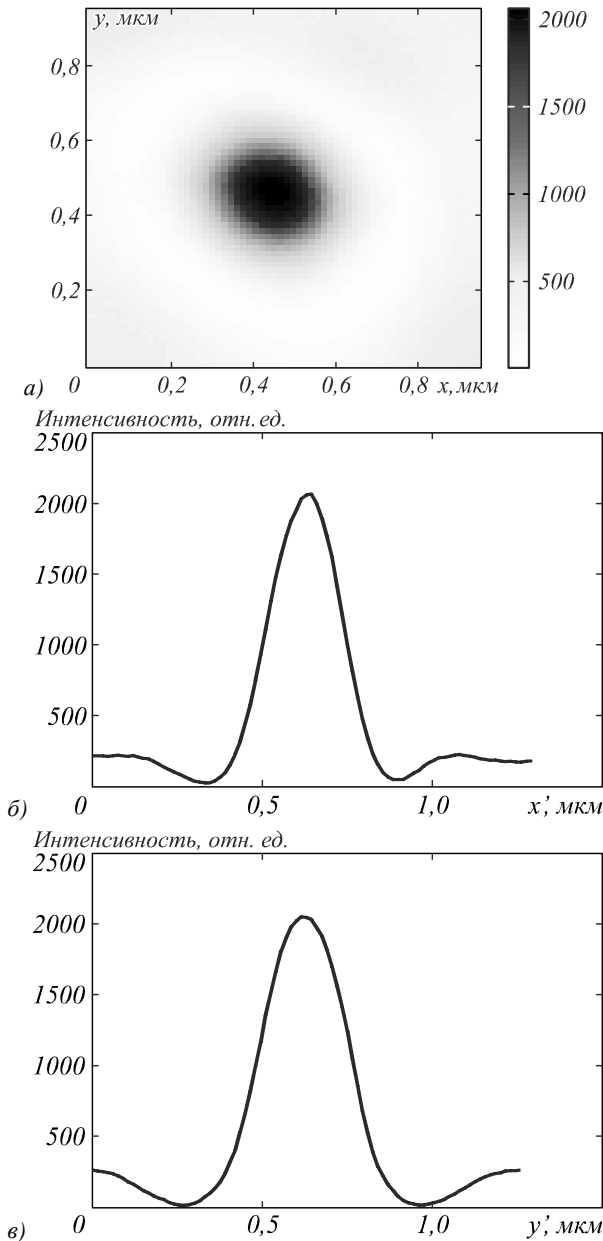


Рис. 8. Распределение интенсивности вблизи выходной поверхности ступеньки со стороны квадрата 0,6 мкм, полученное экспериментально при освещении линейно поляризованным лазерным светом с длиной волны 633 нм: полутоновая картина (а), сечения вдоль минимального и максимального диаметров фокусного пятна (б) и (в)

К сожалению, оказалось, что в схеме микроскопа плоскость поляризации падающего лазерного излучения направлена под углом 45 градусов к декартовым осям x и y (рис. 8а), поэтому слегка эллиптическое фокусное пятно вблизи выходной поверхности ступеньки вытянуто вдоль направления поляризации. Сечения интенсивности фокусного пятна на рис. 8б, в взяты вдоль минимального и максимального диаметров фокусного пятна. Измеренные значения минимального и максимального диаметров фокусного пятна в начале фотонной струи на рис. 8 равны: $FWHM_{min} = (0,39 \pm 0,01)\lambda$ и $FWHM_{max} = (0,45 \pm 0,01)\lambda$.

На рис. 9 показаны в виде квадратиков с вертикальными отрезками экспериментальные значения минимального (9а) и максимального (9б) диаметров фокусных пятен в сечении фотонной наноструи вблизи выходной поверхности ступенек с разной стороной квадрата. Рис. 9а показывает значения диаметра по полуспаду интенсивности в плоскости, перпендикулярной поляризации входного излучения. Рис. 9б показывает измеренный диаметр фокусного пятна и рассчитанное значение поперечной составляющей интенсивности (непрерывная линия) в плоскости, параллельной поляризации входного излучения. Кривые на рис. 9 соответствуют моделированию методом FDTD, квадратики – эксперименту с помощью СБОМ, а вертикальные отрезки показывают погрешность эксперимента.

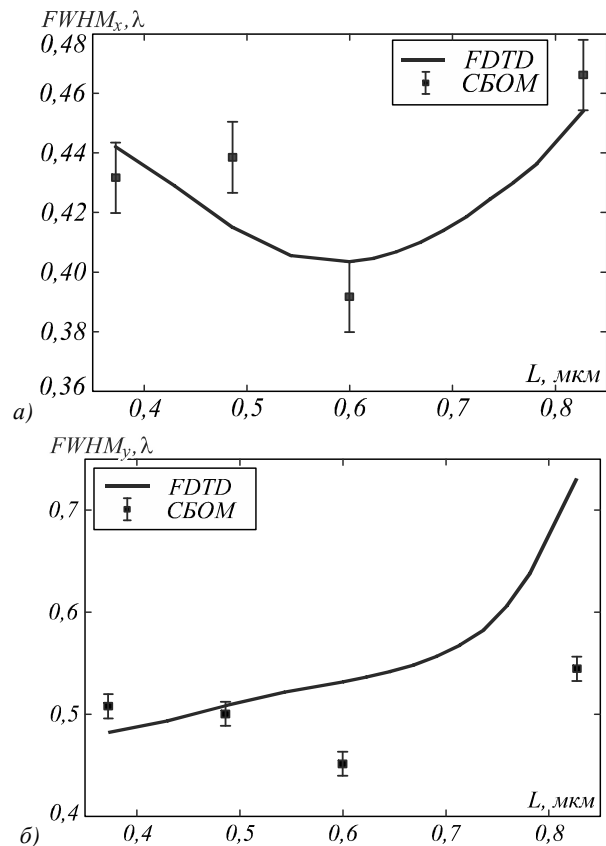


Рис. 9. Зависимость наименьшего (а) и наибольшего (б) диаметров пятна сечения фотонной наноструи по полуспаду интенсивности вблизи выходной поверхности ступеньки от величины стороны квадрата в сечении ступеньки. Непрерывная кривая – моделирование, квадратики с вертикальными отрезками – эксперимент

Из рис. 9 видно, что наименьшее значение диаметра фотонной струи в плоскости, перпендикулярной направлению поляризации входного излучения (т.е. где диаметр пятна минимален), наблюдается для ступеньки шириной 0,6 мкм как в моделировании $FWHM_{min} = 0,40\lambda$, так и в эксперименте $FWHM_{min} = 0,39\lambda$. Расхождение на рис. 9 между экспериментальными точками и кривой моделирования

не превосходит 24% и объясняется неточным позиционированием кантилевера микроскопа в непосредственной близости от поверхности ступеньки. Но даже при этом кривая моделирования лежит внутри полосы значений, определяемой экспериментальными точками. На рис. 10 показаны примеры распределений интенсивности, полученные со СБОМ, когда сторона квадрата сечения ступеньки была равна 0,5 мкм. На этом же рисунке для сравнения приведены распределения интенсивности, полученные при моделировании. Как видно из рис. 10, экспериментальные значения диаметров согласуются не с суммарным, а с поперечным распределением интенсивности. На то, что пирамидальный металлический кантилевер для СБОМ регистрирует преимущественно поперечную компоненту интенсивности и не чувствителен к продольной компоненте, указывалось авторами ранее в [13].

3. Сравнение с фокусировкой микросферами

Чтобы проверить, насколько отличаются по своим характеристикам фотонные наноструи, формируемые с помощью квадратных ступенек, от фотонных наноструй, формируемых сферами [1 – 5], было проведено моделирование фокусировки линейно поляризованной плоской волны сферами с диаметрами, равными сторонам квадратов ступенек: 0,4 мкм; 0,6 мкм и 0,8 мкм. Параметры моделирования были аналогичны параметрам моделирования фокусировки с помощью ступенек. Результаты моделирования приведены на рис. 11 – 13 (эти рисунки аналогичны рис. 2 – 4 для ступенек).

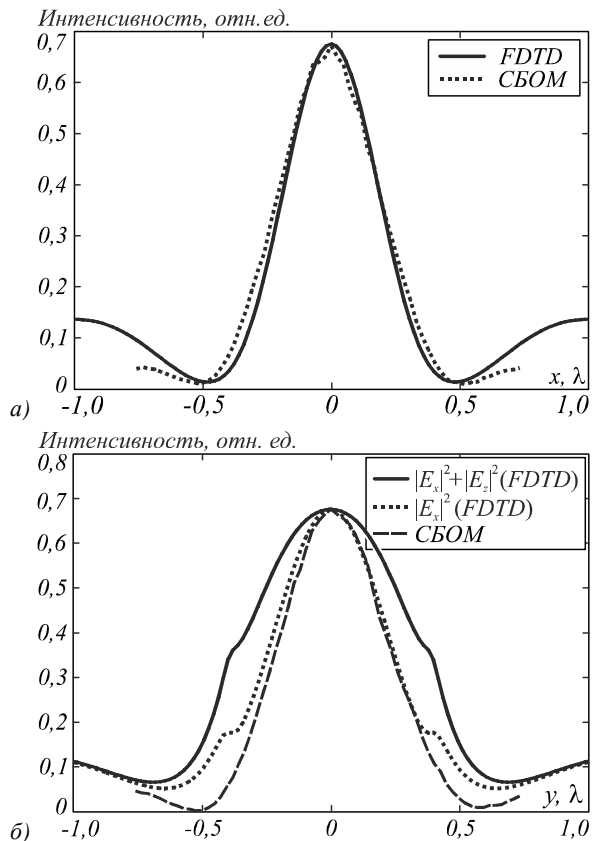


Рис. 10. Распределение интенсивности непосредственно за поверхностью ступеньки со стороны квадрата в сечении 0,5 мкм в плоскостях перпендикулярной (а) и параллельной (б) направлению поляризации входного излучения

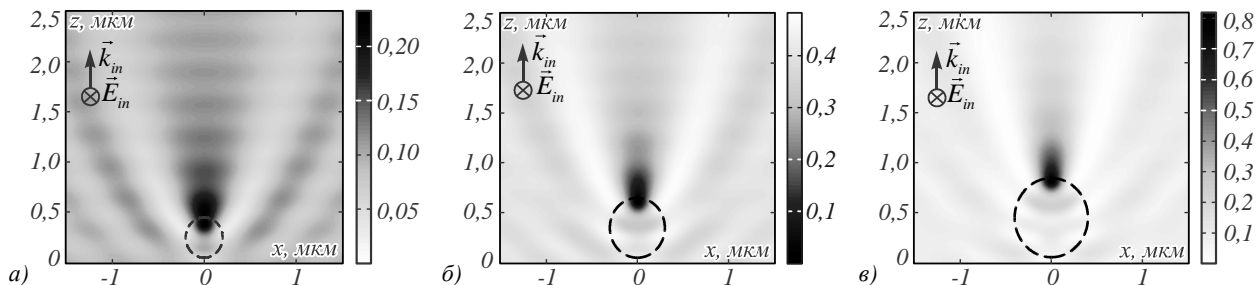


Рис. 11. Распределение интенсивности (негативное изображение) в плоскости, перпендикулярной поляризации входного излучения (xz), для сферы с диаметром 0,4 мкм (а); 0,6 мкм (б) и 0,8 мкм (в). Пунктирной линией показаны границы сферы

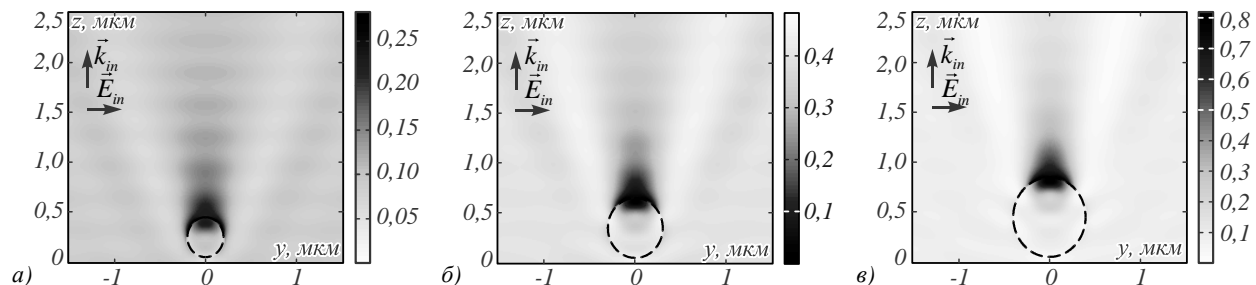


Рис. 12. Распределение интенсивности (негативное изображение) в плоскости, параллельной поляризации входного излучения (yz), для сферы с диаметром 0,4 мкм (а); 0,6 мкм (б) и 0,8 мкм (в). Пунктирной линией показаны границы сферы

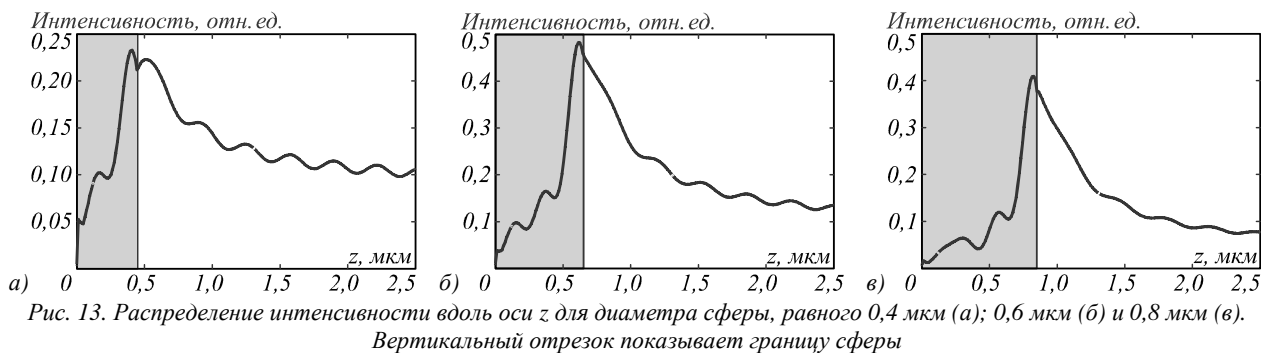


Таблица 1. Сравнение параметров фотонных наноструй, формируемых кварцевыми микросферами и ступеньками с квадратным основанием ($\lambda=633$ нм)

Параметр фотонной наноструи	Ступенька высотой 500 нм со стороны квадратного сечения L			Сфера с диаметром D		
	L = 0,4 мкм	L = 0,6 мкм	L = 0,8 мкм	D = 0,4 мкм	D = 0,6 мкм	D = 0,8 мкм
FWHM _y , λ	0,44	0,40	0,45	0,53	0,43	0,39
FWHM _x , λ	0,48	0,53	0,73	0,74	0,54	0,49
DOF, λ	0,69	1,13	2,08	1,97	0,93	0,59

В табл. 1 приведено сравнение параметров фотонных наноструй, формируемых микросферами и микроступеньками. В табл. 1 глубина фотонной наноструи рассчитывалась как ширина по полуспаду от максимальной интенсивности вне элемента (т.е. если максимум интенсивности находился внутри элемента, то полуспад отсчитывался от значения интенсивности на поверхности). Кроме того, в качестве левой границы полуспада (рис. 13) бралась граница поверхности элемента. Значения диаметров фотонной наноструи вычислялись вблизи поверхности элемента (на расстоянии $0,02\lambda$ от поверхности, что соответствует величине одного шага сетки в FDTD-методе).

Из табл. 1 следует: 1) диаметры фокусных пятен в плоскости, перпендикулярной плоскости поляризации, имеют близкие значения как для сферы, так и для ступеньки; 2) хотя диапазон изменения этих диаметров фокусных пятен больше для сферы (от $0,39\lambda$ до $0,53\lambda$), чем для ступеньки (от $0,40\lambda$ до $0,45\lambda$); за исключением одного случая, все диаметры меньше дифракционного предела ($0,51\lambda$); 3) фокусные пятна для сферы более эллиптически, чем фокусные пятна для ступеньки: при $D = L = 0,4$ мкм для ступеньки фокусное пятно почти имеет форму круга с диаметром $FWHM = 0,44\lambda$, а для сферы фокусное пятно имеет форму эллипса с диаметрами $FWHM_{min} = 0,53\lambda$ и $FWHM_{max} = 0,74\lambda$; 4) глубина фокуса (длина фотонной струи) по полуспаду интенсивности с ростом диаметра сферы и стороны квадратного сечения ступеньки меняется по-разному: растёт для ступеньки от $DOF = 0,69\lambda$ до $DOF = 2,08\lambda$ и, наоборот, падает для сферы от $DOF = 1,97\lambda$ до $DOF = 0,59\lambda$.

Заключение

В работе численно с помощью метода FDTD и экспериментально с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа с пирамидальным металлическим кантилевером с нанотверстием была изучена острая фокусировка линейно поляри-

зованного лазерного излучения с длиной волны 633 нм диэлектрическими кварцевыми ступеньками с квадратными сечениями разной величины и одной высотой 500 нм, изготовленными на кварцевой подложке с показателем преломления $n = 1,46$.

Получены следующие результаты.

– Экспериментально показано, что микроступеньки с квадратным сечением на кварцевой подложке со стороны квадрата 0,4 мкм; 0,5 мкм; 0,6 мкм и 0,8 мкм и все высотой 500 нм при освещении со стороны подложки линейно поляризованным лазерным светом с длиной волны $\lambda = 633$ нм формируют вблизи своей поверхности области повышенной интенсивности (фотонные струи), превышающие интенсивность падающего света почти в 6 раз и имеющие в сечении диаметры по полуспаду интенсивности $0,44\lambda$, $0,43\lambda$, $0,39\lambda$ и $0,47\lambda$, которые меньше дифракционного предела $0,51\lambda$.

– Наименьшая экспериментально зафиксированная ширина фотонной струи наблюдалась для ступеньки со стороной квадрата 0,6 мкм и составила $FWHM_{min} = (0,39 \pm 0,01)\lambda$ и $FWHM_{max} = (0,45 \pm 0,01)\lambda$. Отличие экспериментальных данных от расчёта для данной ступеньки не превышало 11%, а для всех измеренных ступенек – 24%. Погрешность определения диаметра по полуспаду интенсивности и в моделировании, и в эксперименте не превышала $0,01\lambda$ (или 3%).

– Для ступеньки со стороной квадрата 0,6 мкм интенсивность в максимуме фотонной струи составила 6,43 от максимума интенсивности входного излучения. Когда сторона квадрата ступеньки меньше 0,6 мкм, фокус находится внутри ступеньки, а когда сторона квадрата больше длины волны, фокус – снаружи ступеньки.

– Из сравнительного моделирования фокусировки с помощью микросфер с диаметрами от 0,4 мкм до 0,8 мкм и микропараллелепипедов высотой 500 нм со

стороной квадрата в сечении от 0,4 мкм до 0,8 мкм получено, что 1) диаметры фокусных пятен в плоскости, перпендикулярной плоскости поляризации, имеют близкие значения как для сферы, так и для ступеньки; 2) хотя диапазон изменения этих диаметров фокусных пятен больше для сферы (от $0,39\lambda$ до $0,53\lambda$), чем для ступеньки (от $0,40\lambda$ до $0,45\lambda$); за исключением одного случая, все диаметры меньше дифракционного предела ($0,51\lambda$); 3) фокусные пятна для сферы более эллиптически, чем фокусные пятна для ступеньки: при $D = L = 0,4$ мкм для ступеньки фокусное пятно почти имеет форму круга с диаметром $\text{FWHM} = 0,44\lambda$, а для сферы фокусное пятно имеет форму эллипса с диаметрами $\text{FWHM}_{\min} = 0,53\lambda$ и $\text{FWHM}_{\max} = 0,74\lambda$; 4) глубина фокуса (длина фотонной струи) по полуспаду интенсивности с ростом диаметра сферы и стороны квадратного сечения ступеньки меняется по-разному: растёт для ступеньки от $\text{DOF} = 0,69\lambda$ до $\text{DOF} = 2,08\lambda$ и, наоборот, падает для сферы от $\text{DOF} = 1,97\lambda$ до $\text{DOF} = 0,59\lambda$.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 13-07-97008 и 14-07-97039 и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4816.2014.2

Литература

1. **Lu, Y.F.** Laser Writing of a Subwavelength Structure on Silicon (100) Surfaces with Particle-Enhanced Optical Irradiation / Y.F. Lu, L. Zhang, W.D. Song, Y.W. Zheng, B.S. Luk'yanchuk // JETP Letters. – 2000. – V. 72(9). – P. 457-459.
2. **McLeod, E.** Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres / E. McLeod, C.B. Arnold // Nature Nano. – 2008. – V. 3. – P. 413-417.
3. **Li, X.** Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets / X. Li, Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2005. – V. 13(2). – P. 526-533.
4. **Ferrand, P.** Direct imaging of photonic nanojets / P. Ferrand, J. Wenger, A. Devilez, M. Pianta, B. Stout, N. Bonod, E. Popov, H. Rigneault // Optics Express. – 2008. – V. 16(10). – P. 6930-6940.
5. **Kong, S.-C.** Quasi one-dimensional light beam generated by a graded-index microsphere/ S.-C. Kong, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2009. – V. 17(5). – P. 3722-3731.
6. **Devilez, A.** Three-dimensional subwavelength confinement of light with dielectric microspheres / A. Devilez, N. Bonod, J. Wenger, D. Gérard, B. Stout, H. Rigneault, E. Popov // Optics Express. – 2009. – V. 17(4). – P. 2089-2094.
7. **Chen, Z.** Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique / Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2004. – V. 12(7). – P. 1214-1220.
8. **McCloskey, D.** Low divergence photonic nanojets from Si_3N_4 microdisks / D. McCloskey, J.J. Wang, J.F. Donegan // Optics Express. – 2012. – V. 20(1). – P. 128-140.
9. <http://optics.synopsys.com/rsoft/>
10. **Kotlyar, V.V.** Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linearly polarized light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Y. Liu, L. O'Faolain, A.A. Kovalev // Appl. Opt. – 2013. – V. 52(3). – P. 330-339.
11. **Котляр, В.В.** Субволновая локализация света в волноводных структурах / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв, Я.О. Шуюпова, А.Г. Налимов, В.А. Соифер // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 169-186.
12. **Kotlyar, V.V.** Curved laser microjet in near field / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, S.S. Stafeev // Appl. Opt. – 2013. – V. 52(18). – P. 4131-4136.
13. **Stafeev, S.S.** Subwavelength focusing of laser light by microoptics / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, L. O'Faolain // J. Mod. Opt. – 2013. – V. 60(13). – P. 1050-1059.

References

1. **Lu, Y.F.** Laser Writing of a Subwavelength Structure on Silicon (100) Surfaces with Particle-Enhanced Optical Irradiation / Y.F. Lu, L. Zhang, W.D. Song, Y.W. Zheng, B.S. Luk'yanchuk // JETP Letters. – 2000. – V. 72(9). – P. 457-459.
2. **McLeod, E.** Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres / E. McLeod, C.B. Arnold // Nature Nano. – 2008. – V. 3. – P. 413-417.
3. **Li, X.** Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets / X. Li, Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2005. – V. 13(2). – P. 526-533.
4. **Ferrand, P.** Direct imaging of photonic nanojets / P. Ferrand, J. Wenger, A. Devilez, M. Pianta, B. Stout, N. Bonod, E. Popov, H. Rigneault // Optics Express. – 2008. – V. 16(10). – P. 6930-6940.
5. **Kong, S.-C.** Quasi one-dimensional light beam generated by a graded-index microsphere/ S.-C. Kong, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2009. – V. 17(5). – P. 3722-3731.
6. **Devilez, A.** Three-dimensional subwavelength confinement of light with dielectric microspheres / A. Devilez, N. Bonod, J. Wenger, D. Gérard, B. Stout, H. Rigneault, E. Popov // Optics Express. – 2009. – V. 17(4). – P. 2089-2094.
7. **Chen, Z.** Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique / Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2004. – V. 12(7). – P. 1214-1220.
8. **McCloskey, D.** Low divergence photonic nanojets from Si_3N_4 microdisks / D. McCloskey, J.J. Wang, J.F. Donegan // Optics Express. – 2012. – V. 20(1). – P. 128-140.
9. <http://optics.synopsys.com/rsoft/>
10. **Kotlyar, V.V.** Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linearly polarized light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Y. Liu, L. O'Faolain, A.A. Kovalev // Appl. Opt. – 2013. – V. 52(3). – P. 330-339.
11. **Kotlyar, V.V.** Subwavelength localization of light in waveguide structures / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, Ya.O. Shuyupova, A.G. Nalimov, V.A. Soifer // Computer Optics. – 2010. – V. 34(2). – P. 169-186.
12. **Kotlyar, V.V.** Curved laser microjet in near field / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, S.S. Stafeev // Appl. Opt. – 2013. – V. 52(18). – P. 4131-4136.
13. **Stafeev, S.S.** Subwavelength focusing of laser light by microoptics / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, L. O'Faolain // J. Mod. Opt. – 2013. – V. 60(13). – P. 1050-1059.

PHOTONIC NANOJETS FORMED BY SQUARE MICROSTEPSV.V. Kotlyar¹, S.S. Stafeev¹, A.Yu. Feldman²¹ Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences,² FLIR Optical Component Group (Charlotte, USA)**Abstract**

It was experimentally shown that square microsteps with width of 0.4 μm , 0.5 μm , 0.6 μm , 0.8 μm and height of 500 nm illuminated by linearly polarized laser light with wavelength $\lambda = 633$ nm formed near its' surface focal spots (photonic nanojets) with intensity that is 6 times higher than the intensity of incident light and diameters of 0.44λ , 0.43λ , 0.39λ and 0.47λ (less than the diffraction limit 0.51λ). When the square width was smaller than the wavelength, the focal spot was located inside the step. When the square width was larger than the wavelength, the focal spot was located outside the step and looks like a handle.

Key words: photonic nanojet, microstep, FDTD-method, Near-field scanning optical microscopy (NSOM/SNOM).

Сведения об авторах

Сведения об авторе **Котляр Виктор Викторович** – см. стр. 9 этого номера.



Стафеев Сергей Сергеевич, 1985 года рождения. В 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук с 2012 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Область научных интересов: дифракционная оптика, разностное решение уравнений Максвелла, оптика ближнего поля.

E-mail: sergey.stafeev@gmail.com

Sergey Sergeevich Stafeev (b. 1985) received master's degree in Applied Mathematics and Physics in Samara State Aerospace University (2009). He received his PhD in 2012. He is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics.



Фельдман Александр Юрьевич, 1975 года рождения, кандидат химических наук по специальности «Полимерные композитные материалы» (Еврейский иерусалимский университет, Израиль, 2006). Старший инженер в группе новых разработок компании Тессера-Израиль (2006–2009) и впоследствии в компании Дигитальная оптическая корпорация (США, 2009–2013). С августа 2013 ведущий инженер научно-исследовательского отдела микрооптики в компании ФЛИР (США). Область научных интересов: полимеры, фотолитография, интеграция процессов в производстве полупроводников, дигитальных сенсоров и оптических устройств.

E-mail: alexander.feldman@flir.com.

Alexander Feldman, (b. 1975). Received his PhD in Chemistry & Polymer Science from the Hebrew University of Jerusalem, Israel (2006). He held the positions of senior R&D engineer at Tessera-Israel (2006–2009) and at Digital Optics Corporation (USA, 2009–2013). Since August 2013 is working as a lead engineer at FLIR Optical Component Group (USA). Main scientific interests and expertise: polymer sciences, wafer level technologies (packaging and optics), photolithography, innovation and process integration in semiconductors.

Поступила в редакцию 22 декабря 2013 г.