Формирование фотонных наноструй двумерными микропризмами

В.Д. Зайцев [1,2], С.С. Стафеев [1, 2]
[1] ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,
[2] Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

С помощью метода конечных элементов, реализованного в программном пакете COMSOL Multiphysics, численно исследовалась фокусировка лазерного излучения диэлектрическими призмами с треугольным профилем. Было показано, что двумерные треугольные призмы позволяют фокусировать свет в свободном пространстве в пятна с размерами меньше скалярного дифракционного предела. Например, призма из кварцевого стекла с шириной основания 60 мкм и высотой 28,5 мкм, освещаемая светом с длиной волны 4 мкм, формирует фотонную наноструя с максимальной интенсивностью, в 6 раз превышающей интенсивность падающего излучения, и шириной по полуспаду интенсивности, равной 0,38 от длины волны фокусируемого излучения. Размеры фокусного пятна можно уменьшать, если высота призмы подобрана таким образом, чтобы максимум интенсивности располагался внутри призмы. В частности, призма из титаната бария с высотой 21 мкм и шириной основания 60 мкм формирует непосредственно за своей вершиной фокусное пятно с шириной, по полуспаду интенсивности равной 0,25 от длины волны фокусируемого излучения.

Было показано, что использование призмы приводит к меньшей зависимости ширины фокусного пятна от длины волны по сравнению с микроцилиндром. Например, у микроцилиндра из кварцевого стекла с диаметром 60 мкм смена длины волны с 3 мкм до 5 мкм приводит к изменению ширины пятна на 0,09 от длины волны фокусируемого излучения, а у призмы в среднем на 0,05 от длины волны фокусируемого излучения.

Ключевые слова: фотонная наноструя, субволновая фокусировка, метод конечных элементов, диэлектрическая микропризма.

Цитирование: **Зайцев, В.Д.** Формирование фотонных наноструй двумерными микропризмами / В.Д. Зайцев, С.С. Стафеев // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 6. – С. 909-916. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-746.

Citation: Zaitsev VD, Stafeev SS. The photonic nanojets formation by two-dimensional microprisms. Computer Optics 2020; 44(6): 909-916. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-746.

Введение

Преодоление дифракционного предела, или острая фокусировка света, является актуальной задачей в современной оптике и нанофотонике [1 – 6]. Острая фокусировка находит свое применение в таких областях, как оптические системы памяти [7], рамановская спектроскопия [8], наноструктурирование [9], оптическое манипулирование [10] и нанолитография [11, 12].

Интересно, что для получения острого фокуса бывает достаточно использования простых объектов микрооптики, например, диэлектрических цилиндров, отдельных диэлектрических ступенек, микросфер, формирующих вблизи своей поверхности области повышенной интенсивности – фотонные наноструи [13 – 19]. Основной целью работы обычно является достижение сверхмалых поперечных размеров фокуса. В [13] с использованием метода конечных разностей во временной области (метод FDTD) показано наличие фотонных наноструй с шириной по полуспаду интенсивности FWHM = 0,72 λ при распространении света через отверстие микротора. Длина фотонной наноструи составляла 37 λ. В [14] авторы получили сверхдлинный фокус (28 λ) с шириной по полуспаду интенсивности менее 0,5 λ. Он был сформирован двухслойной диэлектрической микросферой. В [16] с использованием метода FDTD показана генерация фотонных наноструй с шириной по полуспаду интенсивности FWHM = 305 нм (0,56 λ) и FWHM = 218 нм (0,4 λ), образованных, соответственно, цилиндром и половиной цилиндра с диаметрами 5 мкм и показателем преломления $n = 1{,}7$ и освещаемых светом с длиной волны 0,55 мкм. Одним из подходов для генерации фотонных наноструй является возбуждение резонансных мод шепчущей галереи [20, 21]. В [20], используя теорию Ми и генетический алгоритм, авторы предложили пятислойный микроцилиндр, фокусирующий ТМ-поляризованный луч с длиной волны 0,633 мкм в ультрадлинную (107,5 длин волн) фотонную наноструя с FWHM = 0,22 λ. Для моделирования фокусировки с помощью разработанного элемента использовался метод конечных элементов (FEM), реализованный в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. Образование фотонных наноструй с использованием материалов с показателем преломления меньше двух рассмотрено в [22]. Используя FEM,

было показано, что фотонные наноструи с FWHM = 0,287 λ могут быть получены с использованием диэлектрических микрочастиц с параболической формой поверхности и показателем преломления 2,5. Фокус формируется на расстоянии, превышающем длину затухания поверхностных волн. В [23] авторы рассматривают генерацию фотонных наноструй с использованием микроцилиндров и микросфер с брэгговскими решетками. Используя теорию Ми, при фокусировке лазерного света с длиной волны 0,5 мкм авторы показали наличие узкого фокуса с FWHM = 0,117 мкм (0,24 λ). В [24] диэлектрические микросферы с радиусом 60 мкм применялись для получения массива фокусных пятен в инфракрасном диапазоне для длин волн от 3 до 5 мкм. В большинстве работ получение фотонных наноструй производится с помощью объектов сферической формы – цилиндров, сфер [13 – 24], однако подобный эффект наблюдается и при прохождении света через несферические объекты – освещаемые со стороны основания конические, бинарные и вихревые аксиконы [25 – 31], микрокубики [32, 33], прямоугольные ступеньки [34], призмы [35], цилиндры, освещаемые со стороны основания [36], объекты произвольной формы [2, 37]. Например, в работе [25] была показана возможность формирования фотонной струи с шириной FWHM = 0,30 λ с помощью конического аксикона, а в работе [38] методом FDTD была рассмотрена фокусировка света многослойным диэлектрическим микрокубом. Было показано, что микрокуб с размером 4×4×4 мкм и $n = 2$ образует наноструя с FWHM = 0,232 мкм (0,39 λ) при фокусировке лазерного импульса с длиной волны 0,6 мкм.

В данной работе рассмотрена фокусировка излучения с помощью диэлектрической треугольной призмы. Моделирование фокусировки проводилось с помощью метода конечных элементов, реализованного в программном пакете COMSOL Multiphysics. В качестве фокусируемого излучения использовался TE-поляризованный Гауссов пучок с шириной перетяжки 80 мкм и длиной волны λ = 4 мкм. Было проведено исследование характеристик фокусного пятна, таких как максимальная интенсивность и ширина пятна по полуспаду интенсивности (FWHM), в зависимости от высоты и материала треугольной призмы.

Было показано, что двумерные треугольные призмы позволяют фокусировать свет в свободном пространстве в пятна с размерами меньше скалярного дифракционного предела. В частности, призма из кварцевого стекла с шириной основания 60 мкм и высотой 28,5 мкм формирует фотонную наноструя с максимальной интенсивностью, в 6 раз превышающей интенсивность падающего излучения, и шириной FWHM = 0,38 λ. А призма из титаната бария с шириной основания 60 мкм и высотой 20 мкм позволяет получить фотонную наноструя с такой же шириной (0,38 λ) и максимальной интенсивностью, в 5 раз превышающей интенсивность падающего излучения. Размеры фокусного пятна можно уменьшать и дальше, если высота призмы подобрана таким образом, чтобы максимум интенсивности располагался внутри призмы. Так, например, призма из титаната бария с высотой 21 мкм и шириной основания 60 мкм формирует непосредственно за своей вершиной фокусное пятно с шириной FWHM = 0,25 λ. Также было проведено исследование характеристик фокусных пятен в зависимости от длины волны фокусируемого света. Было показано, что использование призмы приводит к меньшей зависимости ширины фокусного пятна от длины волны по сравнению с микроцилиндром. Например, у микроцилиндра из кварцевого стекла с диаметром 60 мкм смена длины волны освещающего света с 3 мкм до 5 мкм приводит к изменению ширины пятна на 0,09 λ, а у призмы – в среднем на 0,05 λ.

Фокусировка излучения треугольной призмой из кварцевого стекла

Рассмотрим диэлектрическую треугольную призму из кварцевого стекла ($n = 1{,}46$) со стороной основания 60 мкм. Схема моделирования приведена на рис. 1.

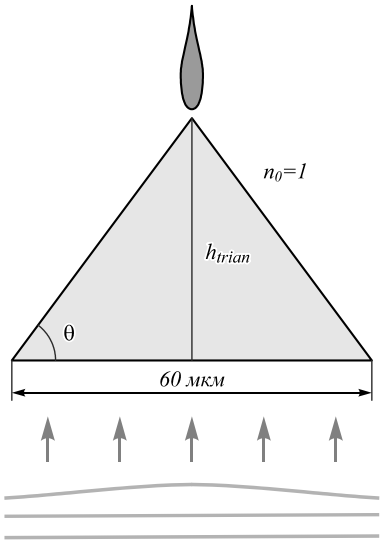

Рис. 1. Схема моделирования для треугольной призмы

С помощью метода конечных элементов, реализованного в пакете COMSOL Multiphysics, проведем моделирование распространения TE-поляризованного излучения с длиной волны 4 мкм через рассматриваемую треугольную призму. В качестве падающей волны возьмем Гауссов пучок с шириной перетяжки 80 мкм. В ходе моделирования здесь и далее воспользуемся нерегулярными сетками с переменным шагом. Так, в областях, близких к разделу двух сред, используем сетку с мелким шагом λ / 40, в то время как остальную область будем рассчитывать с шагом λ / 20. На границах области располагались поглощающие слои PML. В процессе исследования будем изменять высоту треугольной призмы h_{trian} и оценивать максимальную интенсивность $I_{\max}$ формируемого фо-

кусного пятна и его ширину по полуспаду интенсивности FWHMx, для подбора оптимальной высоты призмы. Пример распределения интенсивности в фокусной плоскости и вдоль оси распространения света для призмы с высотой 28,2 мкм приведен на рис. 2. Результаты моделирования приведены в табл. 1 и на рис. 3.

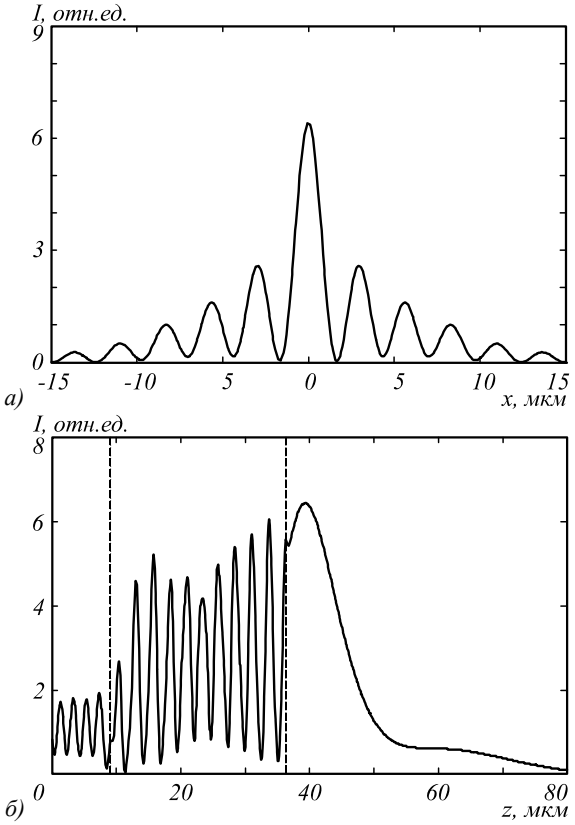

Рис. 2. Распределение интенсивности в фокусе (а) и вдоль оси распространения света (б) при прохождении ТЕ-поляризованного Гауссова пучка с шириной перетяжки 80 мкм через треугольную призму из кварцевого стекла с высотой 28,2 мкм и шириной основания 60 мкм. Границы призмы показаны пунктирной линией, z = 0 соответствует области ввода излучения в расчетную область

Из табл. 1 и рис. 3 видно, что при увеличении высоты призмы интенсивность в фокусном пятне сначала растет, достигая максимума при $h = 24{,}3$ мкм, а потом начинает уменьшаться. Ширина же фокусного пятна постоянно уменьшается и после $h = 25{,}4$ мкм становится меньше скалярного дифракционного предела (FWHM = 0,51 λ). Для призмы с высотой 28,5 мкм формируется фокусное пятно в свободном пространстве с минимальной шириной – FWHM = 0,38 λ. Если высоту увеличить до 29 мкм, то максимум полученного фокусного пятна будет располагаться внутри линзы, а непосредственно за границей раздела двух сред размер фокусного пятна составит FWHM = 0,30 λ.

Фокусировка излучения круглым цилиндром

Для оценки эффективности фокусировки света призмой было проведено исследование фокусировки круглым цилиндром из кварцевого стекла диаметром 60 мкм с помощью аналитического решения [39]. Схема моделирования представлена на рис. 4.

Табл. 1. Зависимость характеристик фокусного пятна от высоты призмы из кварцевого стекла (n =1,46)

h_{trian}, мкм	I_{max}, отн.ед.	FWHMx, λ	f, мкм	DOF, λ
22,6	8,20	0,60	15,5	5,63
23,4	8,67	0,60	13,1	5,00
24,0	8,87	0,58	11,9	4,63
24,3	9,01	0,50	11,2	4,38
24,5	9,00	0,55	10,4	4,25
25,4	8,65	0,53	8,6	3,88
26,8	7,73	0,40	5,7	3,13
28,2	6,02	0,40	3,2	2,50
28,5	6,43	0,38	2,8	2,40
29,0	5,85	0,30	0	1,80

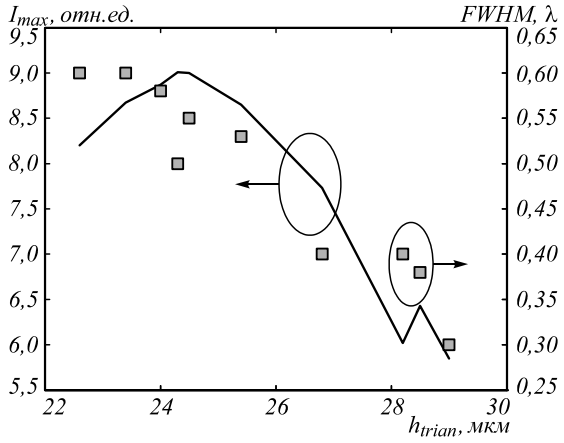

Рис. 3. Зависимость максимальной интенсивности (кривая) и ширины фокусного пятна (квадраты) от высоты призмы

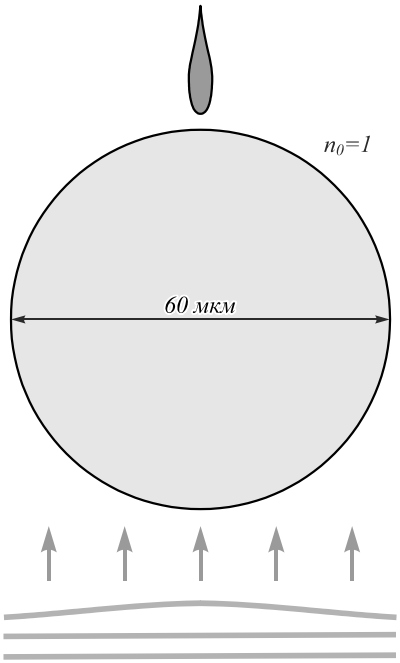

Рис. 4. Схема моделирования для круглого цилиндра

Результаты моделирования фокусировки плоской волны с длиной волны 4 мкм диэлектрическим цилиндром приведены на рис. 5.

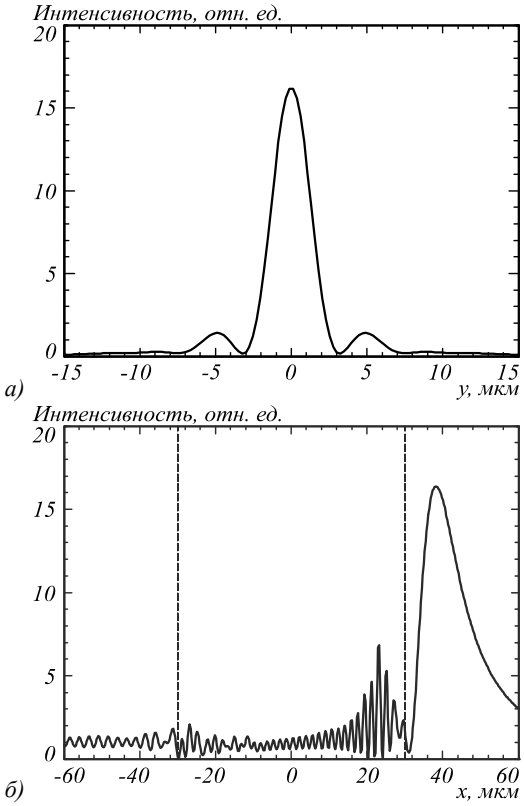

Рис. 5. Распределение интенсивности в фокусе (а) и вдоль оси распространения света (б) при прохождении ТЕ-поляризованной плоской волны через круглый цилиндр из кварцевого стекла с диаметром 60 мкм

Из рис. 5 видно, что ширина фокусного пятна в данном случае равна FWHM = 0,82 λ. Сравнивая параметры фокусных пятен, полученных с помощью цилиндра круглого сечения и треугольной призмы, с одинаковыми характерными размерами, можно видеть, что призма формирует более узкое световое пятно. Однако максимальная интенсивность в фокусе призмы в 2,5 раза меньше, чем в фокусе круглого цилиндра.

На рис. 6 приведено двумерное распределение интенсивности при фокусировке Гауссова пучка на призме и круглом цилиндре.

Влияние показателя преломления на параметры фокусного пятна

Рассмотрим далее влияние показателя преломления материала призмы на характеристики формируемой фотонной наноструи. В качестве материалов для призмы в дополнение к кварцевому стеклу, рассмотренному ранее, добавим полистирол ($n_1 = 1{,}56$) и титанат бария ($n_1 = 1{,}8$). Результаты моделирования представлены в табл. 2, 3 и на рис. 7, 8. Фокусные пятна с наименьшими диаметрами в таблицах отмечены серым цветом.

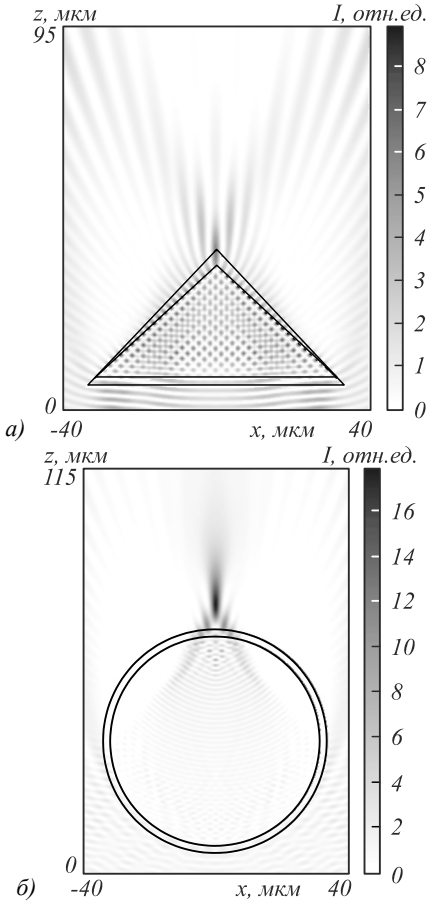

Рис. 6. Двумерная картина дифракции на призме (высота – 28,2 мкм, ширина основания – 60 мкм) (а) и круглом цилиндре (диаметр – 60 мкм) (б)

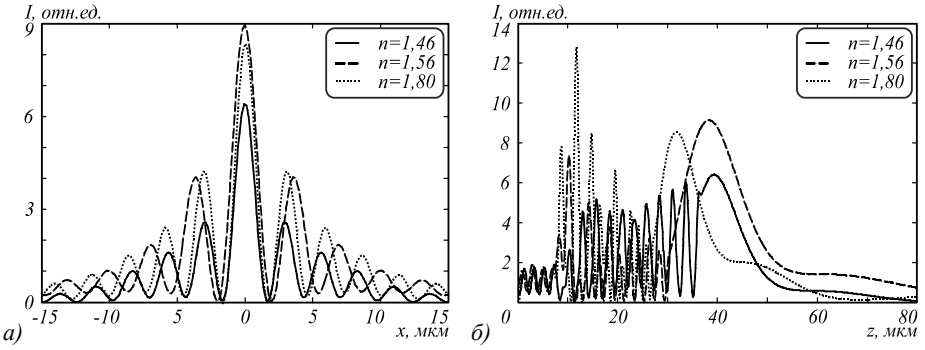

Рис. 7. Распределение интенсивности в фокальной плоскости (а) и вдоль оси распространения пучка (б) при фокусировке света диэлектрической треугольной призмой из кварцевого стекла (n = 1,46, h = 28,5 мкм, непрерывная кривая), из полистирола (n = 1,56, h = 22,6 мкм, пунктирная кривая) и титаната бария (n = 1,8, h = 19 мкм, точечная кривая)

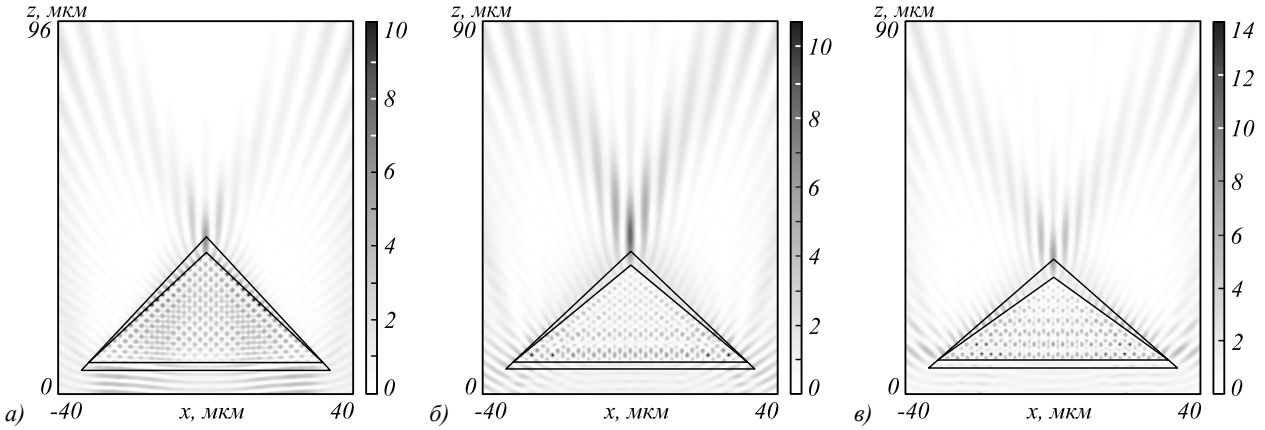

Рис. 8. Двумерное распределение интенсивности при фокусировке света диэлектрической треугольной призмой из кварцевого стекла (а), полистирола (б) и титаната бария (в)

Табл. 2. Параметры фокусного пятна для призмы из полистирола (n = 1,56)

h_{trian}, мкм	I_{max}, отн.ед.	FWHMx, λ	f, мкм	DOF, λ
17,54	7,66	0,70	23,7	8,25
20,04	8,04	0,60	14,8	5,25
21,29	8,37	0,55	10,5	4,13
21,79	8,70	0,50	9,25	3,75
22,04	8,77	0,50	8,80	2,38
22,55	8,85	0,47	7,93	3,38
25,05	5,84	0,40	2,79	2,25
25,30	5,86	0,38	2,41	2,08
25,55	5,75	0,38	1,90	1,88
25,80	5,26	0,30	0	1,63
26,03	4,82	0,30	0	1,28

Табл. 3. Параметры фокусного пятна для призмы из титаната бария (n=1,8)

h_{trian}, мкм	I_{max}, отн.ед.	FWHMx, λ	f, мкм	DOF, λ
15,03	6,08	0,60	16,10	6,00
16,03	8,01	0,54	12,80	4,75
17,03	8,05	0,43	9,40	3,83
17,23	9,02	0,43	9,09	3,83
18,04	6,70	0,40	6,23	2,63
19,04	8,11	0,40	4,80	2,40
19,44	6,50	0,40	3,80	2,15
20,04	5,14	0,38	2,22	1,63
21,04	4,20	0,25	0	1,03

Из табл. 2, 3 видно, что, как и в случае с кварцевым стеклом, удается сформировать пятна с размерами меньше скалярного дифракционного предела. В случае, если максимум интенсивности фокусного пятна располагается в свободном пространстве, наименьшая ширина фокусного пятна равна 0,38 λ. Если же максимум интенсивности смещен внутрь призмы, то ширину удается уменьшить до FWHM = 0,25 λ (призма из титаната бария с высотой 21,04 мкм).

Влияние длины волны фокусируемого света на параметры фокусного пятна

Исследуем теперь, как изменение длины волны повлияет на результаты фокусировки, для этого будем освещать призму из кварцевого стекла светом с длиной волны 3 мкм и 5 мкм. Результаты фокусировки призмой с шириной основания 60 мкм приведены в табл. 4 и 5. Для сравнения в табл. 6 приведены результаты аналитического решения дифракции плоской TE-поляризованной волны на цилиндре с диаметром 60 мкм.

Табл. 4. Зависимость характеристик фокусного пятна от высоты призмы из кварцевого стекла (n=1,46), освещаемой светом с длиной волны 3 мкм

h_{trian}, мкм	I_{max}, отн.ед.	FWHMx, λ	f, мкм	DOF, λ
22,6	7,93	0,60	15,3	7,7
23,4	8,80	0,60	13,1	6,7
24,0	8,90	0,53	11,5	5,8
24,3	9,10	0,53	10,8	5,3
24,5	9,20	0,50	10,0	5,8
25,4	9,48	0,53	7,8	4,2
26,8	8,92	0,47	4,7	3,2
28,2	6,30	0,40	2,4	2,0
28,5	6,59	0,40	2,2	2,3
29,0	5,61	0,30	0,2	1,5

Из сравнения табл. 1, 4 – 6 видно, что призма формирует фокусное пятно с меньшими размерами. Более того, использование призмы приводит к меньшей зависимости ширины фокусного пятна от длины волны фокусируемого света: в табл. 6 ΔFWHM = 0,09 λ, а в табл. 4, 5 ΔFWHM в среднем было равно 0,05 λ. При этом для некоторых значений высоты призмы, например 28,2 мкм, для всех длин волн 3, 4 и 5 мкм ширина пятна совпадает FWHM = 0,4 λ. Стоит, однако, заметить, что ширина пятна по-прежнему остается пропорциональной длине волны λ и меньше становится только коэффициент пропорциональности.

Табл. 5. Зависимость характеристик фокусного пятна от высоты призмы из кварцевого стекла (n=1,46), освещаемой светом с длиной волны 5 мкм

h_{trian}, мкм	I_{max}, отн.ед.	FWHMx,λ	f, мкм	DOF,λ
22,6	7,57	0,60	16,0	5,2
23,4	7,74	0,60	13,4	4,8
24,0	7,80	0,58	11,8	4,2
24,3	7,73	0,56	11,0	4,2
24,5	7,69	0,60	10,5	4,0
25,4	7,81	0,60	8,8	3,5
26,8	7,00	0,48	6,1	3,3
28,2	5,37	0,40	3,2	2,4
28,5	5,43	0,40	3,0	2,4
29,0	6,29	0,38	2,3	2,2

Табл. 6. Ширина и глубина фокусного пятна, формируемого цилиндром из кварцевого стекла с диаметром 60 мкм

λ, мкм	FWHMx, λ	DOF, λ
3	0,64	3,81
4	0,60	3,25
5	0,55	2,69

Заключение

Было показано, что двумерные треугольные призмы позволяют фокусировать свет в свободном пространстве в пятна с размерами меньше скалярного дифракционного предела. В частности, призма из кварцевого стекла с шириной основания 60 мкм и высотой 28,5 мкм формирует фотонную наноструя с максимальной интенсивностью, в 6 раз превышающей интенсивность падающего излучения, и шириной FWHM = 0,38 λ. А призма из титаната бария с шириной основания 60 мкм и высотой 20 мкм позволяет получить фотонную наноструя с такой же шириной (0,38 λ) и максимальной интенсивностью, в 5 раз превышающей интенсивность падающего излучения. Размеры фокусного пятна можно уменьшать и дальше, если высота призмы подобрана таким образом, чтобы максимум интенсивности располагался внутри призмы. Так, например, призма из титаната бария с высотой 21 мкм и шириной основания 60 мкм формирует фокусное пятно с шириной FWHM = 0,25 λ.

Было показано, что использование призмы приводит к меньшей зависимости ширины фокусного пятна от длины волны фокусируемого света по сравнению с микроцилиндром: так, например, у микроцилиндра из кварцевого стекла с диаметром 60 мкм смена длины волны с 3 мкм до 5 мкм приводит к изменению ширины пятна на 0,09 λ, а у призмы – в среднем на 0,05 λ.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований – грант 18-07-01122 в части «Фокусировка излучения треугольной призмой из кварцевого стекла», грант 18-07-01380 в части «Фокусировка излучения круглым цилиндром» и грант 18-29-20003 в части «Влияние показателя преломления на параметры фокусного пятна», и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части «Введение».

Литература

1. **Geints, Yu.E.** Modeling spatially localized photonic nanojets from phase diffraction gratings / Yu.E. Geints, A.A. Zemlyanov // Journal of Applied Physics. – 2016. – Vol. 119. – 15391. – DOI: 10.1063/1.4946846.
2. **Mahariq, I.** Persistence of photonic nanojet formation under the deformation of circular boundary / I. Mahariq, V.N. Astratov, H. Kurt // Journal of Optical Society of America B. – 2016. – Vol. 33. – P. 535-542. – DOI: 10.1364/JOSAB.33.000535.
3. **Zhao, Z.** Multispectral optical metasurfaces enabled by achromatic phase transition / Z. Zhao, M. Pu, H. Gao, J. Jin, X. Li, X. Ma, Y. Wang, P. Gao, X. Luo // Scientific Reports. – 2015. – Vol. 5. – 15781. – DOI: 10.1038/srep15781.
4. **Kozlova, E.S.** Modeling the resonance focusing of a picosecond laser pulse using a dielectric microcylinder / E.S. Kozlova, V.V. Kotlyar, S.A. Degtyarev // Journal of Optical Society of America B. – 2015. – Vol. 32, Issue 11. – P. 2352-2357. – DOI: 10.1364/JOSAB.32.002352.
5. **Wei, P.-K.** Focusing subwavelength light by using nanoholes in a transparent thin film / P.-K. Wei, W.-L. Chang, K.-L. Lee, E.-H. Lin // Optics Letters. – 2009. – Vol. 34, Issue 12. – P. 1867-1869.
6. **Khonina, S.N.** Analysis of polarisation states at sharp focusing / S.N. Khonina, D.A. Savelyev, N.L. Kazanskiy // Optik. – 2016. – Vol. 127, Issue 6. – P. 3372-3378. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2015.12.108.
7. **Li, X.** Multifocal optical nanoscopy for big data recording at 30 TB capacity and gigabits/second data rate / X. Li, Y. Cao, N. Tian, L. Fu, M. Gu // Optica. – 2015. – Vol. 2. – P. 567-570. – DOI: 10.1364/OPTICA.2.000567.
8. **Yi, K.J.** Enhanced Raman scattering by self-assembled silica spherical microparticles / K.J. Yi, H. Wang, Y.F. Lu, Z.Y. Yang // Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 91. – 063528. – DOI: 10.1063/1.2450671.
9. **Bhuyan, M.K.** Single-shot high aspect ratio bulk nanostructuring of fused silica using chirp-controlled ultrafast laser Bessel beams / M.K. Bhuyan, P.K. Velpula, J.P. Colombier, T. Olivier, N. Faure, R. Stoian // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol. 94. – 02197. – DOI: 10.1063/1.4861899.
10. **Li, Y.-C.** Manipulation and detection of single nanoparticles and biomolecules by a photonic nanojet / Y.-C. Li, H.-B. Xin, H.-X. Lei, L.-L. Liu, Y.-Z. Li, Y. Zhang, B.-J. Li // Light: Science and Applications. – 2016. – Vol. 5. – e16176. – DOI: 10.1063/1.2450671.
11. **McLeod, E.** Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres / E. McLeod, C.B. Arnold // Nature Nano. – 2008. – Vol. 3. – P. 413-417. – DOI: 10.1038/nnano.2008.150.
12. **Chang, W.-L.** Fabricating subwavelength array structures using a near-field photolithographic method / W.-L. Chang, Y.-J. Chang, P.-K. Wei, P.H. Tsao // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 88, Issue 10. – 101109.

13. **Zhang, B.** Ultralong photonic nanojet formed by dielectric microtoroid structure / B. Zhang, J. Hao, Z. Shen, H. Wu, K. Zhu, J. Xu, J. Ding // Applied Optics. – 2018. – Vol. 57, Issue 28. – P. 8331-8337. – DOI: 10.1364/AO.57.008331.
14. **Liu, Y.** Characteristics of photonic nanojets from two-layer dielectric hemisphere / Y. Liu, X. Liu, L. Li, W. Chen, Y. Chen, Y. Huang, Z. Xie // Chinese Physics B. – 2017. – Vol. 26, Issue 11. – 114201. – DOI: 10.1088/1674-1056/26/11/114201.
15. **Geints, Y.E**. Photonic nanojet super-resolution in immersed ordered assembly of dielectric microsphere / Y.E. Geints, A.A. Zemlyanov // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2017. – Vol. 200. – P. 32-37. – DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.001.
16. **Darafsheh, A.** Systematic study of the characteristics of the photonic nanojets formed by dielectric microcylinders / A. Darafsheh, D. Bollinger // Optics Communications. – 2017. – Vol. 402. – P. 270-275. – DOI: 10.1016/j.optcom.2017.06.004.
17. **Geints, Y.E**. Comparative analysis of key parameters of "photonic nanojets" from axisymmetric nonspherical microparticles / Y.E. Geints, E.K. Panina, A.A. Zemlyanov // Proceedings of SPIE. – 2018. – Vol. 10833. – 1083312. – DOI: 10.1007/s11082-017-0958-y.
18. **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. – Vol. 12. – P. 1214-1220. – DOI: 10.1364/OPEX.12.001214.
19. **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. – Vol. 13. – P. 526-533. – DOI: 10.1364/OPEX.13.000526.
20. **Huang, Y.** Optimization of photonic nanojets generated by multilayer microcylinders with a genetic algorithm / Y. Huang, Z. Zhen, Y. Shen, C. Min, G. Veronis // Optics Express. – 2019. – Vol. 27, Issue 2. – P. 1310-1325. – DOI: 10.1364/OE.27.001310.
21. **Zhou, S.** Effects of whispering gallery mode in microsphere super-resolution imaging / S. Zhou, Y. Deng, W. Zhou, M. Yu, H.P. Urbach, Y. Wu // Applied Physics B. – 2017. – Vol. 123. – 236. – DOI: 10.1007/s00340-017-6815-7.
22. **Luk'yanchuk, B.** Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow / B. Luk'yanchuk, R. Paniagua-Domínguez, I. Minin, O. Minin, Z. Wang // Optical Materials Express. – 2017. – Vol. 7, Issue 6. – P. 1820-1847. – DOI: 10.1364/OME.7.001820.
23. **Xing, H.** Side-lobes-controlled photonic nanojet with a horizontal graded-index microcylinder / H. Xing, W. Zhou, Y. Wu // Optics Letters. – 2018. – Vol. 43, Issue 17. – P. 4292-4295. – DOI: 10.1364/OL.43.004292.
24. **Abolmaali, F.** Photonic jets for highly efficient mid-IR focal plane arrays with large angle of view / F. Abolmaali, A. Brettin, A. Green, N.I. Limberopoulos, A.M. Urbas, V.N. Astratov // Optics Express. – 2017. – Vol. 25, Issue 25. – P. 31174-31185. – DOI: 10.1364/OE.25.031174.
25. **Kotlyar, V.V.** Modeling the sharp focus of a radially polarized laser mode using a conical and a binary microaxicon / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev // Journal of the Optical Society of America B. – 2010. – Vol. 27, Issue 10. – P. 1991-1997. – DOI: 10.1364/JOSAB.27.001991.
26. **Geints, Y.E.** Microaxicon-generated photonic nanojets / Y.E. Geints, A.A. Zemlyanov, E.K. Panina // Journal of the Optical Society of America B. – 2015. – Vol. 32, Issue 8. – P. 1570-1574.
27. **Khonina, S.** Focused, evanescent, hollow, and collimated beams formed by microaxicons with different conical angles / S. Khonina, S. Degtyarev, D. Savelyev, A. Ustinov // Optics Express. – 2017. – Vol. 25, Issue 16. – P. 19052-19064. – DOI: 10.1364/OE.25.019052.
28. **Хонина, С.Н.** Расчёт дифракции лазерного излучения на двумерном (цилиндрическом) аксиконе с высокой числовой апертурой в различных моделях / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, С.А. Дегтярев // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 670-680.
29. **Khonina, S.N.** High-aperture binary axicons for the formation of the longitudinal electric field component on the optical axis for linear and circular polarizations of the illuminating beam / S.N. Khonina, D.A. Savelyev // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2013. – Vol. 117, Issue 4. – P. 623-630. – DOI: 10.1134/S1063776113120157.
30. **Khonina, S.N.** 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 / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov, D.A. Savelyev, J. Laukkanen, J. Turunen // Journal of Optics. – 2013. – Vol. 15, Issue 8. – 085704. – DOI: 10.1088/2040-8978/15/8/085704.
31. **Degtyarev, S.A.** Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon / S.A. Degtyarev, A.P. Porfirev, S.N. Khonina // Applied Optics. – 2016. – Vol. 55, Issue 12. – P. B44-B48. – DOI: 10.1364/AO.55.000B44.
32. **Kotlyar, V.V.** Photonic nanojets generated using square-profile microsteps / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A. Feldman // Applied Optics. – 2014. – Vol. 53, Issue 24. – P. 5322-5329. – DOI: 10.1364/AO.53.005322.
33. **Nayak, C.** Effect of the matrix dimension on the performance ofphotonic nanojets produce from an array of cubiod profilemicrosteps / C. Nayak, A. Saha // Optik. – 2016. – Vol. 127. – P. 10766-10771.
34. **Савельев, Д.А.** Влияние субволновых деталей микрорельефа на картину дифракции гауссовых пучков / Д.А. Савельев, С.Н. Хонина // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета – 2014. – Т. 43, № 1. – С. 275-286. – DOI: 10.18287/1998-6629-2014-0-1(43)-275-286.
35. **Ang, A.S.** 'Photonic Hook' based optomechanical nanoparticle manipulator / A.S. Ang, A. Karabchevsky, I.V. Minin, O.V. Minin, S.V. Sukhov, A.S. Shalin // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8. – 2029.
36. **Хонина, С.Н.** Острая фокусировка лазерного излучения с помощью двухзонного аксиального микроэлемента / С.Н. Хонина, Д.А. Савельев, А.В. Устинов // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 160-169.
37. **Minin, I.V.** Localized EM and photonic jets from non-spherical and non-symmetrical dielectric mesoscale objects: brief review / I.V. Minin, O.V. Minin, Y.E. Geints // Annalen der Physik. – 2015. – Vol. 527, Issues 7-8. – P. 491-497.
38. **Liu, C.-Y.** Engineering photonic nanojet by a graded-index micro-cuboid / C.-Y. Liu, T.-P. Yen, O.V. Minin, I.V. Minin // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2018. – Vol. 98. – P. 105-110. – DOI: 10.1016/j.physe.2017.12.020.
39. **Никольский, В.В.** Электродинамика и распространение радиоволн : Учеб. пособие для вузов / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1989. – 544 с.

Сведения об авторах

Зайцев Владислав Дмитриевич, 1991 года рождения, студент Самарского национального исследовательского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, субволновая фокусировка, метод конечных элементов. E-mail: *zaicev-vlad@yandex.ru* .

Сведения об авторе **Стафеев Сергей Сергеевич**, см. стр. 870 этого номера.

ГРНТИ: 29.31.15
Поступила в редакцию 23 апреля 2020 г. Окончательный вариант – 6 июля 2020 г.

The photonic nanojets formation by two-dimensional microprisms

V.D. Zaitsev [1,2], S.S. Stafeev [1,2]
[1] IPSI RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, 443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,
[2] Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34

Abstract

Using the finite difference method implemented in the COMSOL Multiphysics software package, the focusing of laser radiation by dielectric prisms with a triangular profile was numerically investigated. It was shown that two-dimensional triangular prisms make it possible to focus light in free space into spots with dimensions smaller than the scalar diffraction limit. In particular, a silica glass prism with a base width of 60 μm and a height of 28.5 μm forms a photonic nanojet with a maximum intensity of 6 times the intensity of the incident radiation and a width of FWHM=0.38λ. A prism from barium titanate with a base width of 60 μm and a height of 20 μm allows to obtain a photonic nanojet with the same width (0.38λ) and a maximum intensity 5 times the intensity of the incident radiation. The size of the focal spot can be reduced further if the height of the prism is selected so that the maximum intensity is located inside the material of the prism. For example, a barium titanate prism with a height of 21 μm and a base width of 60 μm forms a focal spot with a width of FWHM=0.25λ.

Keywords: photonic nanojet, subwavelength focusing, finite element method, dielectric microprism.

Citation: Zaitsev VD, Stafeev SS. The photonic nanojets formation by two-dimensional microprisms. Computer Optics 2020; 44(6): 909-916. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-746.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-07-01122 in part of «Focusing by a triangular silica prism», project No. 18-07-01380 in part of «Focusing by a cylinder» and project No. 18-29-20003 in part of «Influence of the refractive index on the parameters of the focal spot»), Ministry of Science and Higher Education within the State assignment FSRC «Crystallography and Photonics» RAS in part of «Introduction».

References

[1] Geints YuE, Zemlyanov AA. Modeling spatially localized photonic nanojets from phase diffraction gratings. J Appl Phys 2016; 119: 15391. DOI: 10.1063/1.4946846.

[2] Mahariq I, Astratov VN, Kurt H. Persistence of photonic nanojet formation under the deformation of circular boundary. J Opt Soc Am B 2016; 33: 535-542. DOI: 10.1364/JOSAB.33.000535.

[3] Zhao Z, Pu M, Gao H, Jin J, Li X, Ma X, Wang Y, Gao P, Luo X. Multispectral optical metasurfaces enabled by achromatic phase transition. Sci Rep 2015; 5: 15781. DOI: 10.1038/srep15781.

[4] Kozlova ES, Kotlyar VV, Degtyarev SA. Modeling the resonance focusing of a picosecond laser pulse using a dielectric microcylinder. J Opt Soc Am B 2015; 32(11): 2352-2357. DOI: 10.1364/JOSAB.32.002352.

[5] Wei P-K, Chang W-L, Lee K-L, Lin E-H. Focusing subwavelength light by using nanoholes in a transparent thin film. Opt Lett 2009; 34(12): 1867-1869.

[6] Khonina SN, Savelyev DA, Kazanskiy NL. Analysis of polarisation states at sharp focusing. Optik 2016; 127(6): 3372-3378. DOI: 10.1016/j.ijleo.2015.12.108.

[7] Li X, Cao Y, Tian N, Fu L, Gu M. Multifocal optical nanoscopy for big data recording at 30 TB capacity and gigabits/second data rate. Optica 2015; 2: 567-570. DOI: 10.1364/OPTICA.2.000567.

[8] Yi KJ, Wang H, Lu YF, Yang ZY. Enhanced Raman scattering by self-assembled silica spherical microparticles. J Appl Phys 2007; 91: 063528. DOI: 10.1063/1.2450671.

[9] Bhuyan MK, Velpula P K, Colombier JP, Olivier T, Faure N, Stoian R. Single-shot high aspect ratio bulk nanostructuring of fused silica using chirp-controlled ultrafast laser Bessel beams. Appl Phys Lett 2014; 94: 02197. DOI: 10.1063/1.4861899.

[10] Li Y-C, Xin H-B, Lei H-X, Liu L-L, Li Y-Z, Zhang Y, Li B-J. Manipulation and detection of single nanoparticles and biomolecules by a photonic nanojet. Light Sci Appl 2016; 5: e16176. DOI: 10.1063/1.2450671.

[11] McLeod E, Arnold CB. Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres. Nature Nano 2008; 3: 413-417. DOI: 10.1038/nnano.2008.150.

[12] Chang W-L, Chang Y-J, Wei P-K, Tsao PH. Fabricating subwavelength array structures using a near-field photolithographic method. Appl Phys Lett 2006; 88(10): 101109.

[13] Zhang B, Hao J, Shen Z, Wu H, Zhu K, Xu J, Ding J. Ultralong photonic nanojet formed by dielectric microtoroid structure. Appl Opt 2018; 57(28): 8331-8337. DOI: 10.1364/AO.57.008331.

[14] Liu Y, Liu X, Li L, Chen W, Chen Y, Huang Y, Xie Z. Characteristics of photonic nanojets from two-layer dielectric hemisphere. Chin Phys B 2017; 26(11): 11420. DOI: 10.1088/1674-1056/26/11/114201.

[15] Geints YE, Zemlyanov AA. Photonic nanojet superresolution in immersed ordered assembly of dielectric microspheres. J Quant Spectrosc Radiat Transf 2017; 200: 32-37. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.001.

[16] Darafsheh A, Bollinger D. Systematic study of the characteristics of the photonic nanojets formed by dielectric microcylinders. Opt Commun 2017; 402: 270-275. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.06.004.

[17] Geints YE, Panina EK, Zemlyanov AA. Comparative analysis of key parameters of "photonic nanojets" from axisymmetric nonspherical microparticles. Proc SPIE 2018; 10833: 1083312. DOI: 10.1007/s11082-017-0958-y.

[18] Chen Z, Taflove A, Backman V. Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique. Opt Express 2004; 12: 1214-1220. DOI: 10.1364/OPEX.12.001214.
[19] Li X, Chen Z, Taflove A, Backman V. Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets. Opt Express 2005; 13: 526-533. DOI: 10.1364/OPEX.13.000526.
[20] Huang Y, Zhen Z, Shen Y, Min C, Veronis G. Optimization of photonic nanojets generated by multilayer microcylinders with a genetic algorithm. Opt Express 2019; 27(2): 1310-1325. DOI: 10.1364/OE.27.001310.
[21] Zhou S, Deng Y, Zhou W, Yu M, Urbach HP, Wu Y. Effects of whispering gallery mode in microsphere superresolution imaging. Appl Phys B 2017; 123: 236. DOI: 10.1007/s00340-017-6815-7.
[22] Luk'yanchuk B, Paniagua-Domínguez R, Minin I, Minin O, Wang Z. Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow. Opt Mater Express 2017; 7(6): 1820-1847. DOI: 10.1364/OME.7.001820.
[23] Xing H, Zhou W, Wu Y. Side-lobes-controlled photonic nanojet with a horizontal graded-index microcylinder. Opt Lett 2018; 43(17): 4292-4295. DOI: 10.1364/OL.43.004292.
[24] Abolmaali F, Brettin A, Green A, Limberopoulos NI, Urbas AM, Astratov VN. Photonic jets for highly efficient mid-IR focal plane arrays with large angle of view. Opt Express 2017; 25(25): 31174-31185. DOI: 10.1364/OE.25.031174.
[25] Kotlyar VV, Stafeev SS. Modeling the sharp focus of a radially polarized laser mode using a conical and a binary microaxicon. J Opt Soc Am B 2010; 27(10): 1991-1997. DOI: 10.1364/JOSAB.27.001991.
[26] Geints YE, Zemlyanov AA, Panina EK. Microaxicon-generated photonic nanojets. J Opt Soc Am B 2015; 32(8): 1570-1574.
[27] Khonina S, Degtyarev S, Savelyev D, Ustinov A. Focused, evanescent, hollow, and collimated beams formed by microaxicons with different conical angles. Opt Express 2017; 25(16): 19052-19064. DOI: 10.1364/OE.25.019052.
[28] Khonina SN, Ustinov AV, Degtyarev SA. Calculation of diffraction of laser radiation by a two-dimensional (cylindrical) axicon with the high numerical aperture in various models. Computer Optics 2014; 38(4): 670-680.
[29] Khonina SN, Savelyev DA. High-aperture binary axicons for the formation of the longitudinal electric field component on the optical axis for linear and circular polarizations of the illuminating beam. JETP 2013; 117(4): 623-630. DOI: 10.1134/S1063776113120157.
[30] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV, Savelyev DA, 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; 15(8): 085704. DOI: 10.1088/2040-8978/15/8/085704.
[31] Degtyarev SA, Porfirev AP, Khonina SN. Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon. Appl Opt 2016; 55(12): B44-B48. DOI: 10.1364/AO.55.000B44.
[32] Kotlyar VV, Stafeev SS, Feldman A. Photonic nanojets generated using square-profile microsteps. Appl Opt 2014; 53(24): 5322-5329. DOI: 10.1364/AO.53.005322.
[33] Nayak C, Saha A. Effect of the matrix dimension on the performance ofphotonic nanojets produce from an array of cubiod profilemicrosteps. Optik 2016; 127: 10766-10771.
[34] Savelyev DA, Khonina SN. Influence of subwave details of microrelief on the diffraction pattern of gaussian beams. Vestnik of Samara University 2014; 43(1): 275-286. DOI: 10.18287/1998-6629-2014-0-1(43)-275-286.
[35] Ang AS, Karabchevsky A, Minin IV, Minin OV, Sukhov SV, Shalin AS. 'Photonic Hook' based optomechanical nanoparticle manipulator. Sci Rep 2018; 8: 2029.
[36] Khonina SN, Savelyev DA, Ustinov AV. Diffraction of laser beam on a two-zone cylindrical microelement. Computer Optics 2013; 37(2): 160-169.
[37] Minin IV, Minin OV, Geints YE. Localized EM and photonic jets from non-spherical and non-symmetrical dielectric mesoscale objects: brief review. Annalen der Physik 2015; 527(7-8): 491-497.
[38] Liu C-Y, Yen T-P, Minin OV, Minin IV. Engineering photonic nanojet by a graded-index micro-cuboid. Physica E Low Dimens Syst Nanostruct 2018; 98: 105-110. DOI: 10.1016/j.physe.2017.12.020.
[39] Nikolsky VV, Nikolskaya TI. Electrodynamics and radio wave propagation [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1989.

Authors' information

Vladislav Dmitrievich Zaitsev (b. 1991) student of Samara National Research University. Research interests are diffraction optics, finite element method, dielectrics. E-mail: *zaicev-vlad@yandex.ru* .

Sergey S. 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 RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS. Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: *sergey.stafeev@gmail.com* . ORCID: 0000-0002-7008-8007.

Received April 23, 2020. The final version – July 6, 2020.