

## Многофокусная металинза для детектирования различных топологических зарядов при разных длинах волн

А.Г. Налимов<sup>1,2</sup>, В.В. Котляр<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151;

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,  
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

### Аннотация

Рассмотрена комбинированная высокоапертурная металинза в тонкой пленке нитрида кремния диаметром 14 мкм, состоящая из двух наклонных секторных металинз, каждая из которых состоит из набора бинарных субволновых решеток. Моделирование методом конечных разностей во временной области показало, что металинза может одновременно детектировать оптические вихри с двумя топологическими зарядами -1 и -2 почти во всем видимом диапазоне длин волн. Металинза может селективно несколько длин волн, которые фокусируются в разных точках фокальной плоскости: изменение длины волны на 1 нм приводит к смещению фокусного пятна примерно на 4 нм. При освещении металинзы гауссовым пучком с левой круговой поляризацией одновременно формируются два оптических вихря с топологическими зарядами 1 и 2 на расстоянии 6 мкм между собой при фокусном расстоянии линзы 6 мкм. Данную металинзу можно использовать для уплотнения канала передачи информации в беспроводных телекоммуникационных системах с помощью селекции пространственно-временных мод лазерного излучения с разными топологическими зарядами и разными длинами волн. Такая микролинза является примером компактного демультимплексора.

**Ключевые слова:** топологический заряд, оптический вихрь, многофокусная металинза.

**Цитирование:** Налимов, А.Г. Многофокусная металинза для детектирования различных топологических зарядов при разных длинах волн / А.Г. Налимов, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 2. – С. 201-207. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1170.

**Citation:** Nalimov AG, Kotlyar VV. Multifocal metalens for detecting several topological charges at different wavelengths. Computer Optics 2023; 47(2): 201-207. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1170.

### Введение

В последние годы наблюдается интерес к комбинированным металинзам [1–4]. Авторы предлагают различные варианты многофокусных линз [1–2], а также комбинированные согласованные между собой метаповерхности [3–4]. Чаще всего металинзы проектируются в виде столбиков, работающих как резонаторы для определенной длины волны и поляризации [5–10]. При этом необходимо создавать элементы с высоким аспектным соотношением (если не использовать материалы с высоким показателем преломления, например, кремний), а также создавать их с высокой точностью – их высота и поперечные размеры должны быть выдержаны точно, что удорожает их изготовление и использование. Известны также широкополосные металинзы для фокусировки как когерентного линейно-поляризованного света [11], так и света с круговой поляризацией [12].

Одним из применений металинз или метаповерхностей является коллимация света для его ввода в волновод или его вывода [13]. Если волновод многомодовый и моды разделены в нем по длинам волн, то возникает вопрос разделения света на выходе по раз-

ными длинам волн. Это можно сделать с помощью, например, дифракционных решеток [14]. Однако минус такого подхода в необходимости использования двух отдельных устройств – линзы для фокусировки света и дифракционной решетки. Другое интересное применение металинз – создание оптических вихрей с топологическим зарядом [6, 15]. Манипулируя топологическим зарядом, можно передавать дополнительную информацию в пучке, что увеличит полосу пропускания в оптоволокне. С помощью металинз можно и детектировать топологический заряд [16–18].

В данной работе описана комбинированная металинза, способная коллимировать свет, детектировать топологический заряд в пучке и разделять пучки по длинам волн. С помощью такой металинзы можно разделить до трех длин волн видимого диапазона одновременно при условии, что вместе с тем пучки могут иметь различные или одинаковые топологические заряды. При этом максимальное количество комбинаций из длины волны света и величины топологического заряда составляет не менее 17. Такие металинзы можно использовать в устройствах мультиплексирования мод в линиях передачи информации по оптическим волокнам. Преимуществом линзы является ее

широкополосность, а также возможность совместить все три устройства в одном, то есть упрощается и юстировка готового устройства за счет уменьшения числа оптических компонент.

**Теоретическое основание**

Метод расчета металинз в тонкой пленке аморфного кремния для видимого диапазона длин волн описан в [19]. Кратко он заключается в следующем. Например, для фокусировки оптического вихря в дифракционной оптике используется спиральная зонная пластинка (СЗП) [20]. Функция пропускания бинарной фазовой СЗП имеет вид:

$$T_n(r, \varphi) = \text{sgn} \cos \left[ m\varphi + \frac{kr^2}{2f} \right], \tag{1}$$

где  $m$  – топологический заряд (ТЗ) оптического вихря,  $(r, \varphi)$  – полярные координаты,  $k$  – волновое число света с длиной волны  $\lambda$ ,  $f$  – фокусное расстояние параболической линзы.

Глубина бинарного рельефа такой фазовой СЗП должна быть равна:

$$H = \lambda [2(\text{Re}n - 1)]^{-1}, \tag{2}$$

где  $\text{Re}$  – действительная часть показателя преломления  $n$  материала СЗП. Работа полуволновых решеток основана на разных эффективных показателях преломления решетки для двух направлений вектора поляризации: вдоль линий решетки (ТЕ) и поперек их (ТМ) [21]:

$$n_{\text{eff}}^{\text{TE}} = \sqrt{Qn_r^2 + (1-Q)n_m^2}, n_{\text{eff}}^{\text{TM}} = (Qn_r^2 + (1-Q)n_m^2)^{-\frac{1}{2}}, \tag{3}$$

где  $Q$  – филфактор или фактор заполнения решетки (отношение ширины ступеньки к периоду решетки),  $n_r$  – показатель преломления материала ступеньки,  $n_m$  – показатель преломления среды.

Формирование металинзы на основании спиральной фазовой пластинки для падающей круговой поляризации света было подробно рассмотрено в [22]. В данной работе рассчитывались спиральные зонные пластинки и соответствующие им металинзы, формирующие поле с топологическими зарядами 1 и 2. Эти же поля данные металинзы способны детектировать. Для их построения использовались зонные пластинки с порядками 0 и 1. Например, пусть металинза включает в себя матрицу

$$\hat{R}(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ -\sin \varphi & -\cos \varphi \end{pmatrix}$$

преобразования вектора поляризации с помощью угла  $\varphi$ , умноженной на пропускание спиральной пластинки  $e^{im\varphi}$  и функцию пропускания сферической линзы  $\exp(-ikr^2/(2f))$  с порядком, равным 1. Тогда при освещении её светом с левой круговой поляризацией на выходе получим сходящийся в световое кольцо

оптический вихрь с топологическим зарядом 2 и правой круговой поляризацией [22]:

$$\begin{aligned} & \exp \left( i\varphi - i \frac{kr^2}{2f} \right) \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ -\sin \varphi & -\cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} = \\ & = \exp \left( 2i\varphi - i \frac{kr^2}{2f} \right) \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}. \end{aligned} \tag{4}$$

То есть металинза с зонной пластинкой 0-го порядка создает вихрь 1-го порядка в фокусе, а 1-й порядок зонной пластинки, интегрированной в металинзу (спираль), увеличивает порядок еще на единицу, и результирующий порядок получается равным  $m=2$ . Если же подать на ту же металинзу свет с левой круговой поляризацией и вихрем порядка  $-2$ , то на выходе получится фокусное пятно с правой круговой поляризацией и вихрем 0-го порядка, то есть металинза будет фокусировать данный вихрь в круглое фокусное пятно. Аналогично можно построить металинзу, которая детектирует порядок вихря  $m=-1$ . Для этого следует создать металинзу на основе зонной пластинки нулевого порядка, то есть кольцевой зонной пластинки. Такая металинза будет фокусировать свет с левой круговой поляризацией в фокусное пятно с правой круговой поляризацией и вихрем  $m=1$ . А если послать на нее вихрь с  $m=-1$  и левой круговой поляризацией, то в фокусной плоскости получится круглое фокусное пятно с правой круговой поляризацией без вихря ( $m=0$ ).

**Моделирование детектирования ТЗ**

Если необходимо детектировать несколько возможных топологических зарядов в пучке, то свет следует подавать на несколько металинз. Один из вариантов – разделить пучок оптическими кубиками и использовать отдельные металинзы. Но можно создать комбинированную металинзу, состоящую из нескольких, каждая из которых посылает свет в фокусное пятно с заданными координатами. На рис. 1 показана такая металинза, предназначенная для детектирования топологических зарядов  $m=-1$  и  $m=-2$  в падающем пучке с левой круговой поляризацией.

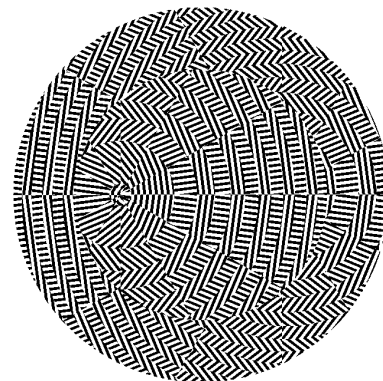


Рис. 1. Интенсивность и фаза света в фокусе (а) для безвихревого пучка с левой круговой поляризацией, металинза для детектирования света с левой круговой поляризацией и топологическими зарядами  $m=-1$  и  $-2$

Две отдельные металинзы на рис. 1, из которых состоит общая металинза, разделены между собой радиусом 4,9 мкм, в круге от 0 до 4,9 мкм находится первая металинза, в кольце от 4,9 до 7 – вторая. Параметры металинзы: расчетная длина волны  $\lambda = 633$  нм, диаметр – 14 мкм, материал линзы – SiN (показатель преломления  $n = 2,04$ ), высота микро-рельефа – 1 мкм, период решеток – 220 нм, фокусное расстояние и расстояние наблюдения – 6 мкм. Металинза рассчитана для фокусировки света с ТЗ  $m = -1$  в фокусное пятно с координатами

(-3 мкм; 0) и ТЗ  $m = -2$  в точку с координатами (3 мкм; 0). Моделирование проводилось методом FDTD в программном пакете FullWave. На рис. 2 показана работа данной линзы. Если послать на нее падающий пучок с левой круговой поляризацией и без вихря, то в фокусах обеих частей металинзы будут оптические вихри с топологическим зарядом  $m = 1$  и  $m = 2$  (рис. 2а). На рис. 2б–г показана интенсивность света в фокусной плоскости на расчетной длине волны света при трех различных падающих пучках с вихрями  $m = -1$  и  $m = -2$ .

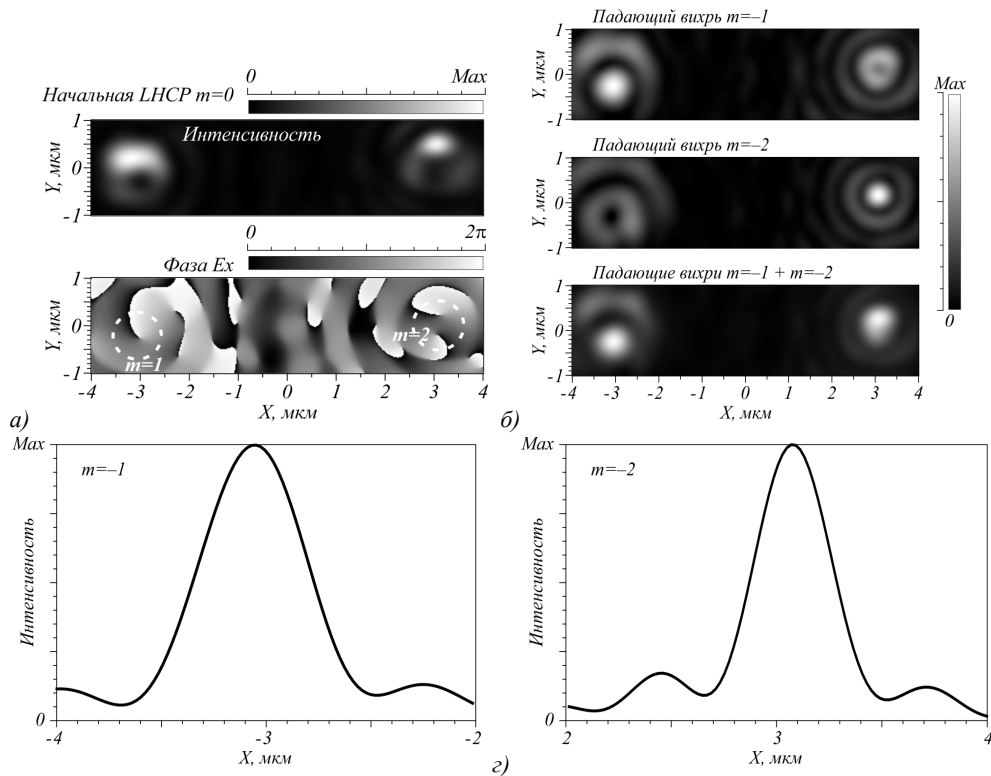


Рис. 2. Интенсивность света (б), сфокусированного металинзой, с топологическим зарядом  $m = -1$  (сверху),  $m = -2$  (посередине), обоих сразу (снизу) и их сечения (в, г) вдоль оси X. Длина волны света  $\lambda = 0,633$  мкм

Видно, что свет с ТЗ  $m = -1$  формирует максимум интенсивности в координатах, близких к расчетным (-3,05; -0,26). А справа, в точке, близкой к (3; 0), наблюдается световое кольцо, поскольку там фокусируется вихрь с правой круговой поляризацией и порядком  $m = 1$ . При смене начального ТЗ на -2 круглое фокусное пятно «переходит» направо, формируя максимум интенсивности в координатах (3,08; 0,17). Слева образуется кольцо с минимумом интенсивности по его центру, поскольку там оказывается сфокусирован вихрь с правой круговой поляризацией и порядком  $m = -1$ . То есть, наблюдая за максимумом интенсивности, можно определить ТЗ падающего пучка. Поскольку часть металинзы, ответственная за падающее поле с ТЗ  $m = -2$ , находится на внешнем круге, числовая апертура такой линзы выше и фокусное пятно получается более узким (рис. 2г). Если же послать на такую металинзу волну с левой круговой поляризацией без вихря, то в обоих фокусах будут сформированы коль-

ца, различные по диаметру, поскольку слева окажется сфокусирован вихрь с правой круговой поляризацией и порядком  $m = 1$ , а справа – вихрь с правой круговой поляризацией и порядком  $m = 2$  (рис. 2а).

### Моделирование различных длин волн

Уплотнения мод в волноводе можно добиться, используя разные длины волн и разделяя затем световой пучок по ним. Поэтому интересно, как будет работать такая металинза на разных длинах волн. На рис. 3 показаны графики зависимости максимума интенсивности и его X координаты, а также графики зависимости ширины по полуспаду интенсивности FWHM от длины волны света для падающего поля с ТЗ  $m = -1$  и  $m = -2$ .

Из рис. 3 видно, что металинза работает в широком диапазоне длин волн. Детектировать топологический заряд в пучке  $m = -1$  возможно в диапазоне длин волн от 490 до 720 нм. Но кроме того, при изменении длины волны света фокусное пятно сдвигается вдоль

оси X. В диапазоне от 500 нм до 720 нм сдвиг вдоль оси X составляет приблизительно 910 нм, в то время как ширина по полуспаду интенсивности не превышает 600 нм. То есть можно говорить о детектировании не только топологического заряда в пучке, но и одновременно длины волны, так как при такой ширине фокусного пятна и сдвиге возможно разрешить два максимума при разной длине волны. Это, в свою очередь, означает, что может не быть необходимости разделять свет по длинам волн, что уменьшает возможные потери при детектировании ТЗ. При этом несмотря на то, что положение фокусного пятна рассчитывалось в точке с  $X = -3$  мкм на длине волны  $\lambda = 633$  нм, оно немного смещено: на расчетной длине волны  $X = -3,05$  мкм. А максимум интенсивности находится на длине волны 570 нм.

То же самое можно сказать про пучок с ТЗ  $m = -2$ . В этом случае тоже можно говорить о детектировании длин волн вместе с топологическим зарядом. Рабочий диапазон металлинзы также несколько смещен в сторону более коротких длин волн – от 500 до 700 нм, при этом сдвиг фокусного пятна вдоль оси X при этих длинах волн составляет 860 нм при ширине по полуспаду интенсивности, не превышающей 480 мкм, то есть можно говорить о возможности детектирования различных длин волн света по смещению фокусного пятна. Наименьшая ширина фокусного пятна в длинах волн для  $m = -1$  равна примерно 485 нм, для  $m = -2$  – 380 нм. Тенденция к уменьшению фокусного пятна с ростом числовой апертуры заметна и из рис. 2.

Из рис. 4а, б видно, что длины волн 523 и 703 нм могут быть разрешены независимо от наличия обеих вихрей в падающем пучке, так как фокусные пятна не перекрываются. Отношение сигнал-шум (далее будем называть его  $p = S/N$ , где  $S$  – полезная составляющая интенсивности (интенсивность сфокусированного света данной длины волны),  $N$  – паразитная составляющая интенсивности, то есть интенсивность света от соседнего фокусного пятна) составляет не менее 18:1, то есть  $p = 18$  (рис. 4а). Добавление вихря с третьей длиной волны 613 нм может разрешиться с соотношением сигнал-шум примерно  $p = 2,8$  при наличии двух предыдущих длин волн. Её наличие ухудшит разрешение первых двух длин волн 523 и 703 нм, однако расположение датчиков интенсивности для этих двух фокусных пятен по их краям (левого и правого на рис. 4), захватывая их наполовину, по возможности без центрального пика, может существенно улучшить соотношение сигнал-шум, что приведет к успешному разделению всех трех длин волн при любых их комбинациях в падающем пучке.

Похожим образом выглядят эти данные и для вихря с ТЗ  $m = -2$  (рис. 5).

Поскольку числовая апертура для этого ТЗ выше, фокусные пятна стали уже, и фокусное пятно для  $m = -2$ ,  $\lambda = 703$  нм попадает на второе кольцо от фокусного пятна с  $\lambda = 523$  нм. А центральный пик стал

еще сильнее. Однако если посмотреть на рис. 5а, б, понятно, что при использовании только двух крайних длин волн вихрь с  $\lambda = 523$  нм разрешится с  $p = 7,7$ , вихрь с  $\lambda = 703$  нм – с  $p = 4$ . Даже при наличии вихря с  $\lambda = 613$  нм максимумы двух соседних длин волн могут быть найдены в пучке за счет более узких фокусных пятен. А если ослабить интенсивность вихря с  $\lambda = 613$  нм до возможного контраста  $p = 2,1$  (пунктирный график на рис. 5а), то все три длины волн при  $m = -2$  не будут мешать друг другу.

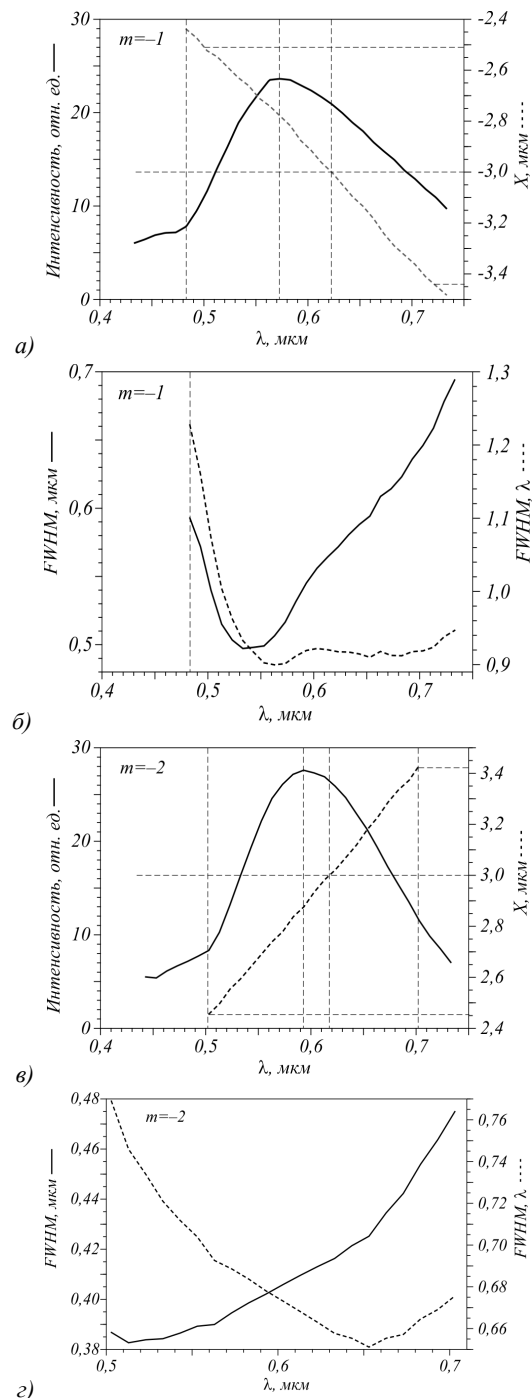


Рис. 3. Зависимости интенсивности, координаты X максимума интенсивности (а, в) и его ширины по полуспаду интенсивности (б, г) от длины волны света

Возникает вопрос, а как будет мешать пучок с  $m = -1$  и любыми длинами волн при детектировании отдельных длин волн в пучке с  $m = -2$ ? На рис. 6а приведены сечения через центр фокусных пятен с «хвостами» фокусных пятен от вихря с ТЗ  $m = -2$ , которые потенциально могут помешать детектированию моды с  $m = -1$ . Длина волны света при этом равна 613 нм. На рис. 6б показаны аналогичные результаты для фокусного пятна вихря с ТЗ  $m = -2$ . Видно, что сами вихри на этой длине волн не мешают друг другу, однако на других длинах

волн (523 нм, 703 нм) смещение мод уже не позволит их найти с контрастом  $p = 2$  или более. То есть допустимо наличие одновременно двух вихрей с  $m = -1$  и  $m = -2$  на центральной длине волны, а для детектирования различных длин волн скорее всего потребуется временное разделение световых пучков. Итого, количество мод, которые можно разрешить такой комбинированной металинзой, составит минимум 17 (по 8 с каждым ТЗ, временное разделение между собой и два ТЗ одновременно на одной длине волны).

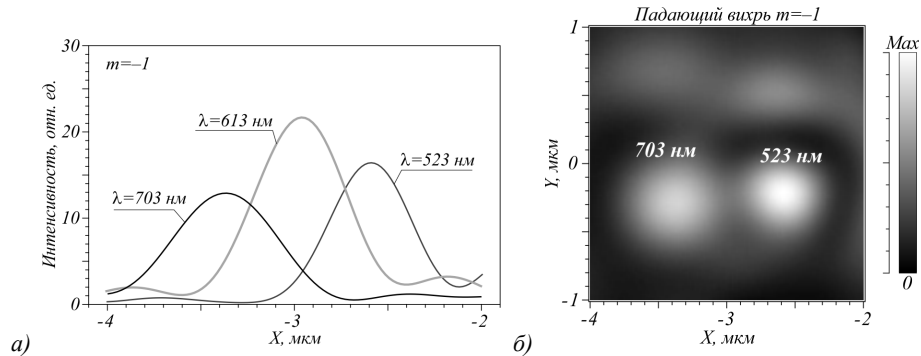


Рис. 4. Сечения максимумов интенсивности сфокусированного вихря с ТЗ  $m = -1$  для трех длин волн  $\lambda = 523$  нм, 613 нм и 703 нм (а), одновременное расположение в фокусной плоскости двух сфокусированных вихрей (б) в соответствии с их относительными интенсивностями

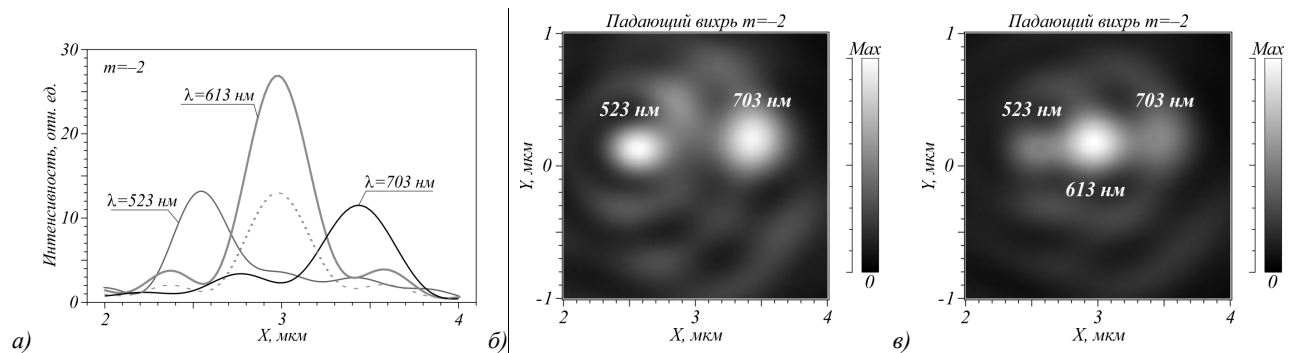


Рис. 5. Сечения максимумов интенсивности сфокусированного вихря с ТЗ  $m = -2$  для трех длин волн  $\lambda = 523$  нм, 613 нм и 703 нм (а), одновременное расположение в фокусной плоскости двух сфокусированных вихрей (б) и всех трех (v) в соответствии с их относительными интенсивностями. Пунктирной линией на (а) показано такое ослабление излучения с длиной волны 613 нм, при котором все три вихря могут быть успешно разрешены в любых комбинациях с достаточным контрастом

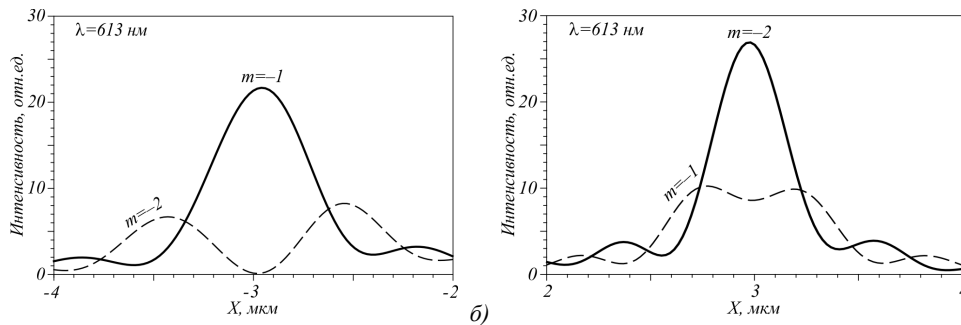


Рис. 6. Сечение через центр фокусных пятен при наличии двух вихрей с одной длиной волны  $\lambda = 613$  нм и двумя ТЗ  $m = -1$  и  $m = -2$

Добавим, что проводилось моделирование также и вихрей с большими номерами ТЗ – 3 и –4. Было замечено, что такие линзы способны работать с прием-

лемой эффективностью, только если они располагаются во внешних кольцах комбинированной металинзы. При этом размер области моделирования значительно

вырастает, что существенно увеличивает время моделирования, необходимое для получения зависимостей от длины волны падающего света. Поэтому эти данные не приводятся в настоящей статье. Но подчеркнем, что данный подход к созданию комбинированной металинзы работоспособен и на больших величинах ТЗ.

### Заключение

В работе показано, что, используя комбинированную металинзу, состоящую из двух отдельных металинз, можно разделять не только вихри с различными топологическими зарядами, но и различные длины волн. Предложенная металинза работает в широком диапазоне длин волн от 500 до 700 нм, что позволяет выполнять точное определение топологического заряда в падающем поле и его длину волны. Кроме того, при одном значении топологического заряда сдвиг фокусного пятна вдоль поперечной оси позволяет детектировать одновременно до трех вихрей на разных длинах волн с достаточным значением контраста (2 или более), что дает 8 различных комбинаций наличия или отсутствия вихрей в падающем поле, а при использовании двух топологических зарядов количество возможных комбинаций составляет не менее 17. Такую металинзу можно использовать в телекоммуникации для разделения пучков не только по длине волны света, но и по топологическому заряду, что дает возможность дополнительного уплотнения мод. Детектировать топологические заряды на основании формируемого распределения интенсивности можно с помощью как специально изготовленных отдельных датчиков, так и ПЗС-матрицы, если брать информацию с определенных её пикселей.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-22-00265) в части «Теоретическое основание», «Моделирование различных длин волн», а также при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в частях «Введение», «Заключение», «Моделирование детектирования ТЗ».

### References

- [1] Wang W, Guo Z, Zhou K, Sun Y, Shen F, Li Y, Qu S, Liu S. Polarization-independent longitudinal multi-focusing metalens. *Opt Express* 2015; 23: 29855-29866. DOI: 10.1364/OE.23.029855.
- [2] Tian S, Guo H, Hu J, Zhuang S. Dielectric longitudinal bifocal metalens with adjustable intensity and high focusing efficiency. *Opt Express* 2019; 27: 680-688. DOI: 10.1364/OE.27.000680.
- [3] Kim C, Kim S, Lee B. Doublet metalens design for high numerical aperture and simultaneous correction of chromatic and monochromatic aberrations. *Opt Express* 2020; 28: 18059-18076. DOI: 10.1364/OE.387794.
- [4] Li M, Li S, Chin L, Yu Y, Tsai D, Chen R. Dual-layer achromatic metalens design with an effective Abbe number. *Opt Express* 2020; 28: 26041-26055. DOI: 10.1364/OE.402478.
- [5] Shan D, Xu N, Gao J, Song N, Liu H, Tang Y, Feng X, Wang Y, Zhao Y, Chen X, Sun Q. Design of the all-silicon long-wavelength infrared achromatic metalens based on deep silicon etching. *Opt Express* 2022; 30: 13616-13629. DOI: 10.1364/OE.449870.
- [6] Chantakit T, Schlickriede C, Sain B, Meyer F, Weiss T, Chatham N, Zentgraf T. All-dielectric silicon metalens for two-dimensional particle manipulation in optical tweezers. *Photonics Res* 2020; 8: 1435-1440. DOI: 10.1364/PRJ.389200.
- [7] Fan C, Chuang T, Wu K, Su G. Electrically modulated varifocal metalens combined with twisted nematic liquid crystals. *Opt Express* 2020; 28: 10609-10617. DOI: 10.1364/OE.386563.
- [8] Ma X, He W, Xin L, Yang Z, Liu Z. Imaging performance of a mid-infrared metalens with a machining error. *Appl Opt* 2022; 61: 60-68. DOI: 10.1364/AO.438728.
- [9] Qian Z, Tian S, Zhou W, Wang J, Guo H. Broadband achromatic longitudinal bifocal metalens in the visible range based on a single nanofin unit cell. *Opt Express* 2022; 30: 11203-11216. DOI: 10.1364/OE.450601.
- [10] Xie Y, Zhang J, Wang S, Liu D, Wu X. Broadband polarization-insensitive metalens integrated with a charge-coupled device in the short-wave near-infrared range. *Opt Express* 2022; 30: 11372-11383. DOI: 10.1364/OE.454878.
- [11] Liu M, Cao J, Xu N, Wang B. Broadband achromatic metalens for linearly polarized light from 450 to 800 nm. *Appl Opt* 2021; 60: 9525-9529.
- [12] Wang W, Guo Z, Li R, Zhang J, Liu Y, Wang X, Qu S. Ultra-thin, planar, broadband, dual-polarity plasmonic metalens. *Photonics Res* 2015; 3: 68-71.
- [13] Ye H, Sun Q, Guo Z, Hou Y, Wen F, Yuan D, Qin F, Zhou G. Theoretical realization of single-mode fiber integrated metalens for beam collimating. *Opt Express* 2021; 29: 27521-27529.
- [14] Wang G, Habib U, Yan Z, Gomes N, Sui Q, Wang J, Zhang L, Wang C. Highly efficient optical beam steering using an in-fiber diffraction grating for full duplex indoor optical wireless communication. *J Lightw Technol* 2018; 36: 4618-4625.
- [15] Shen Z, Xiang Z, Wang Z, Shen Y, Zhang B. Optical spanner for nanoparticle rotation with focused optical vortex generated through a Pancharatnam–Berry phase metalens. *Appl Opt* 2021; 60: 4820-4826.
- [16] Guo Y, Zhang S, Luo X. Spin-decoupled metasurface for simultaneous detection of spin and orbital angular momenta via momentum transformation. *Light Sci Appl* 2021; 10: 63.
- [17] Jin Z, Janoschka D, Deng J, Ge L, Dreher P, Frank B, Hu G, Ni J, Yang Y, Li J, Yu G et al. Phyllotaxis-inspired nanosieves with multiplexed orbital angular momentum. *eLight* 2021; 1: 1.
- [18] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG, O'Faolain L, Kotlyar MV. A dual-functionality metalens to shape a circularly polarized optical vortex or a second-order cylindrical vector beam. *Photonics Nanostruct* 2021; 43: 100898. DOI: 10.1016/j.photonics.2021.100898.
- [19] Kotlyar VV, Nalimov AG, Stafeev SS, Hu C, O'Faolain L, Kotlyar MV, Gibson D, Song S. Thin high numerical aperture metalens. *Opt Express* 2017; 25(7): 8158-8167. DOI: 10.1364/OE.25.008158.
- [20] Heckenberg NR, McDuff R, Smith CP, White AG. Generation of optical singularities by computer-generated holograms. *Opt Lett* 1992; 17(3): 221-223.

[21] Lalanne P, Lemercier-Lalanne D. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures. *J Mod Opt* 1996; 43: 2063-2085.

[22] Kotlyar VV, Nalimov AG. A vector optical vortex generated and focused using a metalens. *Computer Optics* 2017; 41(5): 645-654. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-645-654.

#### *Сведения об авторах*

**Налимов Антон Геннадьевич**, 1980 года рождения, окончил Самарский государственный аэрокосмический университет в феврале 2003 года по специальности «Физика». Поступил в очную аспирантуру СГАУ по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в 2003 году, окончил её по специальности 01.04.05 «Оптика» в 2006 году. Работает на кафедре технической кибернетики в Самарском университете в должности доцента, в ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук, соавтор 140 работ и 3 патентов. E-mail: [anton@ipsiras.ru](mailto:anton@ipsiras.ru).

**Котляр Виктор Викторович**, 1957 года рождения, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН и по совместительству профессор кафедры технической кибернетики Самарского университета (СГАУ). В 1979 году окончил физический факультет Куйбышевского государственного университета, в 1988 году защитил кандидатскую диссертацию в Саратовском государственном университете, а в 1992 году – докторскую диссертацию в Центральном конструкторском бюро Уникального приборостроения РАН (г. Москва). Область научных интересов: нанофотоника, дифракционная компьютерная оптика. Публикации: 300 научных трудов, 5 монографий, 7 авторских свидетельств. E-mail: [kotlyar@ipsiras.ru](mailto:kotlyar@ipsiras.ru).

*ГРНТИ: 29.31.15*

*Поступила в редакцию 1 июня 2022 г. Окончательный вариант – 22 сентября 2022 г.*

---

# Multifocal metalens for detecting several topological charges at different wavelengths

A.G. Nalimov<sup>1,2</sup>, V.V. Kotlyar<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> IPISI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,  
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151;

<sup>2</sup> Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34

## Abstract

A combined high-aperture metalens in a thin silicon nitride film, which consists of two inclined sector metalens, is considered. Each sector metalens consists of a set of binary subwavelength gratings. The diameter of the lens is 14  $\mu\text{m}$ . It has been shown using time-domain finite difference method that the metalens can simultaneously detect optical vortices with two topological charges – 1 and –2, in almost the entire visible wavelength range. The metalens can distinguish several wavelengths that are focused at different points in the focal plane: a 1 nm change in wavelength results in a focal spot shift of about 4 nm. When the metalens is illuminated by a Gaussian beam with left-handed circular polarization, two optical vortices with topological charges 1 and 2 are simultaneously formed at 6 nm between each other at focal distance equals 6 nm. This metalens can be used to increase information in transmission channel in wireless telecommunication systems by selecting the space-time modes of laser radiation with different topological charges and different wavelengths. The considered microlens is an example of a compact demultiplexer.

**Keywords:** topological charge, optical vortex, multifocal metalens.

**Citation:** Nalimov AG, Kotlyar VV. Multifocal metalens for detecting several topological charges at different wavelengths. *Computer Optics* 2023; 47(2): 201-207. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1170.

**Acknowledgements:** The work was partly funded by the Russian Science Foundation under grant #22-22-00265 (Sections “Theoretical background”, “Numerical simulation of different incident wavelengths”) and the RF Ministry of Science and Higher Education within a state contract with the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS (Sections “Introduction”, “Numerical simulation of detecting several TCs”, and “Conclusion”).

---

## Authors’ information

**Anton Gennadyevich Nalimov** (b. 1980), graduated from Samara State Aerospace University in February, 2003. Entered in postgraduate study in 2003 on speciality 05.13.18 “Mathematical modeling and program complexes”, finished it in 2006 with speciality 01.04.05 “Optics”. A.G. Nalimov works on Technical Cybernetics department in Samara National Research University as an associate professor, works as a scientist in the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia. Candidate in Physics and Mathematics, coauthor of 100 papers and 3 inventions. E-mail: [anton@ipsiras.ru](mailto:anton@ipsiras.ru).

**Victor Victorovich Kotlyar** is a head of Laboratory at the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS and professor of Computer Science department at Samara National Research University. He received his MS, PhD and DrSc degrees in Physics and Mathematics from Samara State University (1979), Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instrumentation, the Russian Academy of Sciences (1992). He is SPIE- and OSA-member. He is co-author of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current interests are diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, and optical vortices. E-mail: [kotlyar@ipsiras.ru](mailto:kotlyar@ipsiras.ru).

---

Received June 1, 2022. The final version – September 22, 2022.

---