

## Оптическое измерение характеристик тонких пленок с помощью спиральных зонных пластинок

А.Г. Налимов<sup>1,2</sup>, Е.С. Козлова<sup>1,2</sup>, С.С. Стафеев<sup>1,2</sup>, В.В. Котляр<sup>1,2</sup>, В.В. Подлипов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт»,  
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

В работе предложен способ измерения физических характеристик плоских тонких образцов (тонких пленок) – толщины, показателя преломления и наклона. Измерения осуществляются с помощью вихревой спиральной зонной пластинки, формирующей три максимума интенсивности, которые вращаются при удалении от плоскости зонной пластинки. Погрешность измерения наклона образца составляет доли градуса, погрешность измерения его толщины – менее 5 нм. Моделирование показало, что после металлинзы формируются три максимума интенсивности, которые вращаются в пространстве с угловой скоростью  $136^\circ/\text{мкм}$ , что почти вдвое больше, чем в аналогичных работах.

**Ключевые слова:** спиральная зонная пластинка, сенсор толщины, сенсор перемещения.

**Цитирование:** Налимов, А.Г. Оптическое измерение характеристик тонких пленок с помощью спиральных зонных пластинок / А.Г. Налимов, Е.С. Козлова, С.С. Стафеев, В.В. Котляр, В.В. Подлипов // Компьютерная оптика. – 2025. – Т. 49, № 1. – С. 21-29. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1493.

**Citation:** Nalimov AG, Kozlova ES, Stafeev SS, Kotlyar VV, Podlipnov VV. Optical measurement of characteristics of thin films using a spiral zone plate. Computer Optics 2025; 49(1): 21-29. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1493.

### Введение

Вращающиеся лазерные пучки стали известны после работ [1–4]. В [1] показали, что вращающиеся лазерные пучки можно сформировать как осевую суперпозицию пучков Лагерра–Гаусса (ЛГ) с определенными номерами. В [2, 3] экспериментально сформировали вращающиеся лазерные пучки, как суперпозицию пучков ЛГ с помощью призмы Волластона в резонаторе лазера [3] и с помощью дифракционного оптического элемента (ДОЭ) [2]. В [4] также экспериментально сформировали вращающиеся лазерные пучки с помощью ДОЭ, но эти пучки являлись суперпозицией пучков Бесселя. В работе [5] изучался спиральный конический пучок, сформированный с помощью ДОЭ с пропусканием  $\exp(-i\alpha r\varphi)$ , где  $(r, \varphi)$  – полярные координаты в сечении пучка. В [6] рассмотрен двухлепестковый вращающийся пучок, состоящий из двух пучков ЛГ с разными длинами волн. В [7, 8] рассматривались способы повышения эффективности формирования двухлепестковых вращающихся пучков. В [8] получена эффективность формирования такого пучка – 57%. В [9] исследовался орбитальный угловой момент вращающихся пучков, которые являются суперпозицией пучков Бесселя–Гаусса, а в [10] измерялась скорость вращения таких пучков. В [11] было показано, что вращающиеся лазерные пучки могут иметь нулевой орбитальный угловой момент. В [12] сформированы лазерные пучки, имеющие в своем сечении четыре вращающихся ле-

пестка. Вращающиеся лазерные пучки используются для увеличения продольного разрешения в оптических микроскопах. Так, в [13] с помощью вращающегося двухлепесткового лазерного пучка получена трехмерная локализация отдельной флуоресцентной молекулы с разрешением несколько нанометров. В [14] спиральную зонную пластинку второго порядка использовали для определения параметров диффузии флуоресцентных микросфер диаметром 100 нм. В [15] с помощью метаповерхности сформировали с эффективностью 70% двухлепестковый вращающийся пучок. В [16] использовали двухлепестковый вращающийся пучок для трехмерной локализации квантовых точек с разрешением около 10 нм. В [17] двухлепестковый вращающийся пучок сформировали с помощью спирального аксикона второго порядка. Во всех рассмотренных выше работах угловая скорость вращения пучков в поперечной плоскости не превышает  $50^\circ/\text{мкм}$ .

В данной работе исследуется трехлепестковый вращающийся лазерный пучок, который может быть сформирован с помощью спиральной зонной пластинки (ЗП) третьего или второго порядка. Если смещать ЗП вдоль оптической оси, то в поперечном сечении пучка, прошедшего эту ЗП, сформируются локальные максимумы интенсивности, которые будут вращаться вокруг оптической оси. Если измерить с помощью CCD-матрицы угол поворота трехлепесткового распределения интенсивности, то можно определить величину смещения ЗП. Помещая между ЗП и

CCD-камерой тонкие пленки, можно по измерению угла поворота трехлепесткового пучка определить толщину (вернее, изменение толщины) пленки. Смещая пленку поперек оптической оси, по измерению угла поворота трех-лепесткового пучка можно измерять микрорельеф (изменение толщины) пленки по сечению. Если между ЗП и CCD-камерой поместить тонкую кювету, через которую будет протекать жидкость, то по измерению угла наклона трехлепесткового пучка можно измерять показатель преломления жидкости (вернее, изменение показателя преломления). Кроме того, если тонкую пластинку, помещенную между ЗП и CCD-камерой, вращать на небольшой угол вокруг оси, перпендикулярной оптической оси, то по измерению угла поворота трехлепесткового пучка можно измерить угол поворота тонкой пластинки. Отметим, что скорость вращения лепестков в распределении интенсивности в данной работе приблизительно  $136^\circ/\mu\text{км}$ , что примерно вдвое больше, чем в аналогичных работах по определению трехмерных координат нанообъектов [13, 16]. Например, в [13] угловая скорость вращения двухлепесткового распределения интенсивности была  $45^\circ/\mu\text{км}$ .

### 1. Спиральная фазовая пластинка третьего порядка

Трехлепестковый лазерный пучок в данной работе формируется с помощью спиральной ЗП, аналогично тому, как в [17] двухлепестковый вращающийся пучок формировался с помощью спирального аксикона. Использование в данной работе ЗП вместо аксикона уменьшает расстояние вдоль оптической оси, на котором пучок поворачивается на тот же угол. То есть высокая числовая апертура и малое фокусное расстояние ЗП позволяет увеличить угловую скорость вращения распределения интенсивности по сравнению со спиральным аксиконом более чем вдвое [17]. Кроме того, использование спирали третьего порядка в отличие от аксикона второго порядка в [17] позволяет увеличить точность измерения угла поворота за счет усреднения по трем лепесткам. Далее с помощью моделирования найдем зависимость угла поворота трехлепесткового пучка от расстояния смещения ЗП.

Функция пропускания рассматриваемой фазовой спиральной ЗП имеет вид:

$$\tau(r, \varphi) = \exp\left(im\varphi - \frac{ikr^2}{2f}\right), \quad (1)$$

где  $(r, \varphi)$  – полярные координаты в плоскости ЗП,  $m$  – топологический заряд (в этой работе  $m=2, 3, 4$ ),  $k$  – волновое число света с длиной волны  $\lambda$ ,  $f$  – фокусное расстояние параболической линзы. Из (1) можно получить функцию пропускания бинарной амплитудной спиральной ЗП:

$$\tau_1(r, \varphi) = \frac{1}{2}\left(1 + \text{sgn}\left(\cos\left(m\varphi - \frac{kr^2}{2f}\right)\right)\right), \quad (2)$$

где  $\text{sgn}(x) = \{1, x > 0; -1, x < 0\}$ .

В моделировании использовалась спиральная бинарная амплитудная зонная пластинка Френеля порядка  $m=3$  (рис. 1а) с фокусным расстоянием  $f=\lambda$ ,  $\lambda=532$  нм – длина волны. Числовая апертура такой ЗП почти 1. Амплитудную ЗП легче изготовить по технологии электронной литографии, чем фазовую ЗП [18]. Но углы поворота распределения интенсивности в фокусной плоскости для фазовой и амплитудной пластинок будут одинаковыми при прочих равных условиях. Размер ЗП при моделировании был выбран равным  $8 \times 8$  мкм, чтобы уменьшить время моделирования. На подложке из стекла нанесен слой алюминия толщиной  $h=60$  нм, то есть ЗП представляет собой амплитудный элемент. Шаблон рельефа спиральной ЗП показан на рис. 1. Моделирование проводилось с помощью метода FDTD, реализованного в программном пакете FullWave (RSoft), сетка разбиения по всем трем координатам составляла  $\lambda/30$ . Падающая волна представляла собой гауссов пучок с радиусом перетяжки  $w=3$  мкм, ограниченный апертурой с радиусом 4 мкм.

Оптический сенсор перемещения работает следующим образом (рис. 1б). Гауссов пучок с линейной поляризацией выходит из лазера, расширяется микрообъективом и собирается сферической линзой на поверхность спиральной ЗП. В прошедшем свете после ЗП на некотором расстоянии вдоль оптической оси формируются три локальных максимума интенсивности (рис. 1б). Если смещать CCD-камеру вдоль оптической оси, то распределение интенсивности в сечении пучка в виде трех лепестков будет вращаться как одно целое. Измеряя угол поворота лепестков, можно определить величину смещения ЗП или CCD-камеры. Вращение трех лепестков происходит потому, что на разные поперечные плоскости приходит свет от окружностей разного радиуса. А из-за спиральности ЗП три ветви спирали в трех разных местах пересекают окружности разного радиуса. Три лепестка будут видны и будут вращаться до тех пор, пока ЗП не начнет работать как целое, то есть когда в каждую точку пучка будет приходить свет от всех точек ЗП.

На рис. 2 показана зависимость угла поворота  $\varphi$  трех максимумов интенсивности от расстояния наблюдения вдоль оптической оси  $z$  (мкм) в свободном пространстве, рассчитанная для различных порядков  $m$ .

Моделирование показало, что до фокусной плоскости три максимума интенсивности еще не сформированы. Они появляются только после фокусной плоскости ( $f=\lambda=0,532$  мкм), распространяются и вращаются примерно до расстояния 2 мкм (рис. 2а). После этого расстояния распределение интенсивности постепенно распадается на неоднородные световые кольца, и три максимума интенсивности становятся неразличимы.

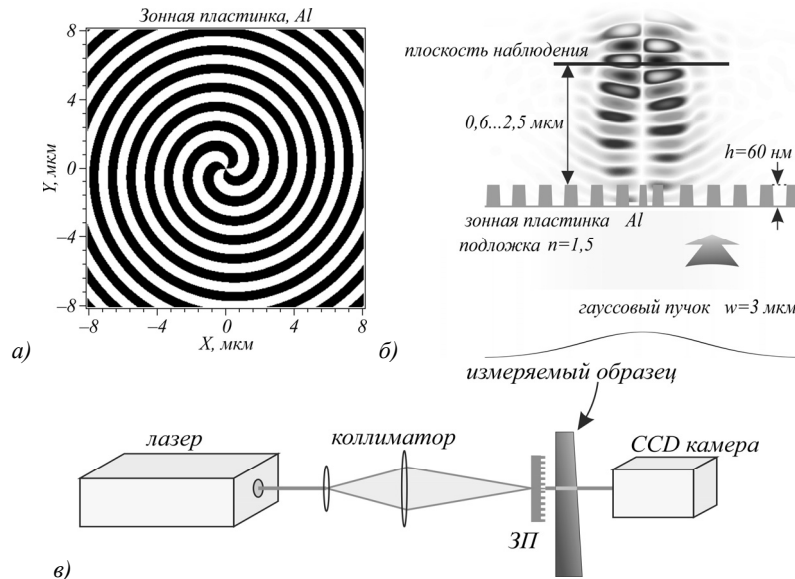


Рис. 1. (а) Спиральная зонная пластинка (черный цвет – пропускание 0, белый цвет – пропускание 1); (б) прохождение гауссова пучка через спиральную алюминиевую ЗП; (в) оптическая схема датчика толщины, перемещения, показателя преломления и угла поворота тонкой пленки

Видно, что линия графика зависимости угла поворота распределения интенсивности на рис. 2а для случая  $m=3$  имеет наибольшую длину, до значений  $z=2,5$  мкм. Видно также, что с ростом порядка  $m$  уменьшается скорость вращения максимумов интенсивности. Скорость вращения наибольшая для порядка  $m=2$ , но начиная с расстояния  $z=2$  мкм максимумы интенсивности начинают сливаться, что затрудняет их различимость и возможность измерения поворота на угол  $\varphi$  (рис. 2в). Кроме того, контраст изображений для значений  $m > 3$  или  $m < 3$  хуже, как можно увидеть из рис. 2в, г. Для  $m > 3$  (например,  $m=4$ ) на оптической оси появляется дополнительный максимум интенсивности, и все максимумы интенсивности, вращающиеся вокруг оптической оси, становятся ближе друг к другу. По этой причине было проведено моделирование ЗП для порядка  $m=3$ .

Угол поворота одного из максимумов интенсивности (на рис. 2 на него указывает стрелка) определялся следующим образом. Сначала находились три точки с максимальной интенсивностью в сечении пучка. Потом находилась линия, соединяющая выделенный максимум интенсивности с серединой отрезка, соединяющего центры двух других максимумов. Эта линия показана на рис. 2 белым цветом. Далее определялся угол, который составляет эта белая линия с горизонтальной осью  $x$ . На рис. 2г показаны точки (обозначены стрелкой), которые используются для получения средней координаты максимума интенсивности, то есть используются точки, значение интенсивности которых превышает 0,85 от локального максимума интенсивности. Такое усреднение помогает получить более точное положение пиков.

Из рис. 2а видно, что на расстоянии около 2 мкм после плоскости фокуса ( $f=0,532$  мкм) угол поворота

изменится от  $-50$  градусов до  $210$  градусов (диапазон изменения угла поворота около  $260$  градусов). «Скорость», с которой поворачивается один конкретный максимум интенсивности, равна  $136^\circ/\text{мкм}$ , то есть поворот на полный оборот происходит за  $2,63$  мкм. Например, для случая  $m=2$  она равна  $211^\circ/\text{мкм}$ , для  $m=4$  скорость равна  $102^\circ/\text{мкм}$ . На рис. 2з, 2д показаны примеры расчета угла поворота максимума при  $z=1,3$  мкм и  $z=1,6$  мкм. Угол поворота к оси  $X$  составляет  $49,3^\circ$  для  $z=1,3$  мкм и  $95^\circ$  для  $z=1,6$  мкм. Расчет производился в автоматическом режиме при смещении плоскости наблюдения на  $0,1$  мкм, уровень, выше которого интенсивность принималась в расчет, составлял  $0,85$  от максимума. Заметим, что в данном случае скорость вращения пучка почти в  $2,5$  раза больше, чем в работе [17]. Моделирование показало, что при выбранных параметрах задачи можно с уверенностью определить поворот максимума на  $1$  градус. Это означает, что минимальное перемещение, которое можно измерить с помощью данного сенсора, равно  $1000/136 = 7$  нм.

Распределение интенсивности на рис. 2 вращается против часовой стрелки. Это происходит из-за того, что порядок спирали на рис. 1 положительный ( $m > 0$ ). Если бы порядок спирали был отрицательный ( $m < 0$ ), то максимумы интенсивности вращались бы по часовой стрелке.

Далее приведено сравнение скоростей вращения лепестков интенсивности для аксикона [17] и спиральной ЗП (рис. 1а). Скорость вращения оптического вихря с  $m$  лепестками после аксикона с периодом  $T$  приведена в [17]:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta z} \approx \frac{\pi\lambda}{mT^2}, \tag{3}$$

где  $\Delta\varphi$  – угол поворота распределения интенсивности при изменении расстояния наблюдения на величину  $\Delta z$  вдоль оптической оси,  $m$  – порядок аксикона. Скорость вращения максимумов интенсивности после фокусной плоскости спиральной ЗП (1). Скорость вращения максимумов интенсивности может быть выражена как:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta z} \approx \frac{\pi\sqrt{n}}{mf}, \quad (4)$$

где  $n$  – номер крайнего кольца ЗП,  $f$  – фокусное расстояние. Сравнивая (3) и (4), можно увидеть, что в обоих случаях скорость вращения является постоянной величиной (угол поворота меняется линейно с ростом расстояния) и обратно пропорциональна порядку спирали  $m$ . То есть для обоих случаев скорость вращения для  $m=3$  будет меньше, чем для  $m=2$ . Ми-

нимальный период аксикона в (3) может быть равен длине волны  $T=\lambda$ , фокусное расстояние в (4) в нашем случае равно длине волны  $f=\lambda$ . В этом случае скорость вращения (4) будет выше, чем скорость вращения (3) в  $\sqrt{n}$  раз. Из рис. 1б видно, что при расстояниях наблюдения до 2 мкм наибольший вклад в интенсивность вносят первые 1-2 кольца ЗП. Если положим  $n=1,5$ , то квадратный корень из него будет  $\sqrt{n}=1,22$ , и скорость (4) в нашем случае (рис. 2) будет равна:  $\Delta\varphi/\Delta z \approx 1,22\pi/(3 \times 0,532) = 2,4$  рад/мкм =  $137,5^\circ/\mu\text{м}$ . Эта величина несколько выше, чем результат моделирования ( $136^\circ/\mu\text{м}$ ). Из рис. 2а видно, что с увеличением порядка спирали  $m$  скорость вращения падает, что согласуется с (4). Более того, отношение скоростей, полученное из рис. 2а, в точности равно отношению порядков спирали:  $211/136 = 3/2$ ,  $136/102 = 4/3$ .

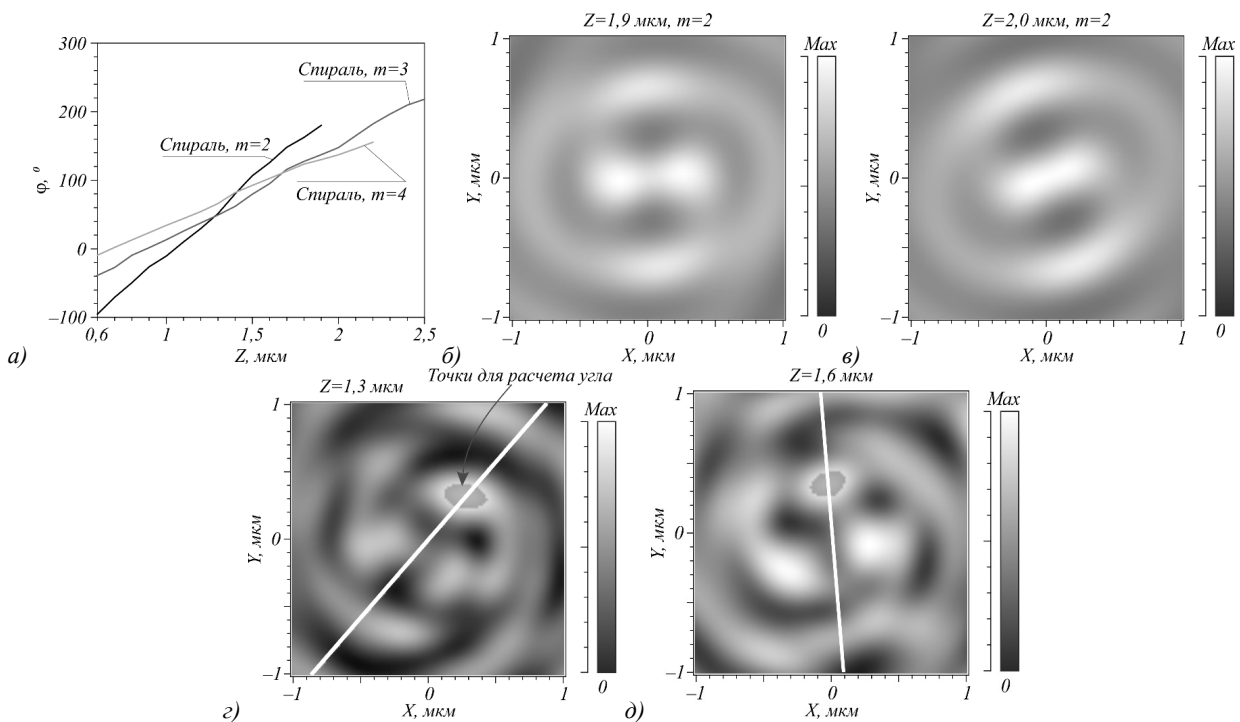


Рис. 2. Зависимость угла поворота  $\varphi$  одного конкретного максимума интенсивности от расстояния наблюдения  $z$  от верхнего края рельефа ЗП для  $m = 2, 3, 4$  (а), распределения интенсивности для  $z = 1,9$  мкм (б),  $z = 2,0$  мкм (в), распределения интенсивности при  $z = 1,3$  мкм (г) и  $z = 1,6$  мкм (д) для  $m = 3$ . На изображениях интенсивности пятном отмечены те точки вокруг максимума интенсивности, по которым производился расчет угла поворота

## 2. Измерение толщины прозрачной пленки

С помощью измерения угла поворота максимумов можно не только определять величину смещения ЗП или CCD-камеры, но и измерять другие величины. В данном параграфе мы рассмотрим, с какой точностью данный оптический сенсор может измерять толщины тонких пленок. Пусть между спиральной ЗП (рис. 1а) и плоскостью наблюдения (CCD-камера на рис. 1в) помещена тонкая плоская диэлектрическая пластина (тонкая пленка), тогда угол поворота максимумов интенсивности трехлепесткового пучка будет пропорционален толщине пластины. На рис. 3 показана схе-

ма моделирования (а) и результирующая зависимость угла поворота  $\varphi$  от толщины пластины  $H$  (б).

На рис. 3в, г показаны распределения интенсивности трехлепесткового пучка, прошедшего ЗП (рис. 1а) и измеряемую тонкую пластину (рис. 3а) толщиной  $H = 0,4$  мкм (рис. 3в) и  $H = 0,7$  мкм (рис. 3г). Показатель преломления пластины  $n = 1,5$ . Расстояние между пластиной и ЗП взято  $d = 0,2$  мкм (рис. 3а), толщина пластины менялась в диапазоне от 0,1 до 1,5 мкм с шагом 0,2 мкм, угол поворота пластины  $\alpha = 0$ . Плоскость наблюдения (CCD-камера) расположена на расстоянии 2 мкм от верхнего края рельефа ЗП.

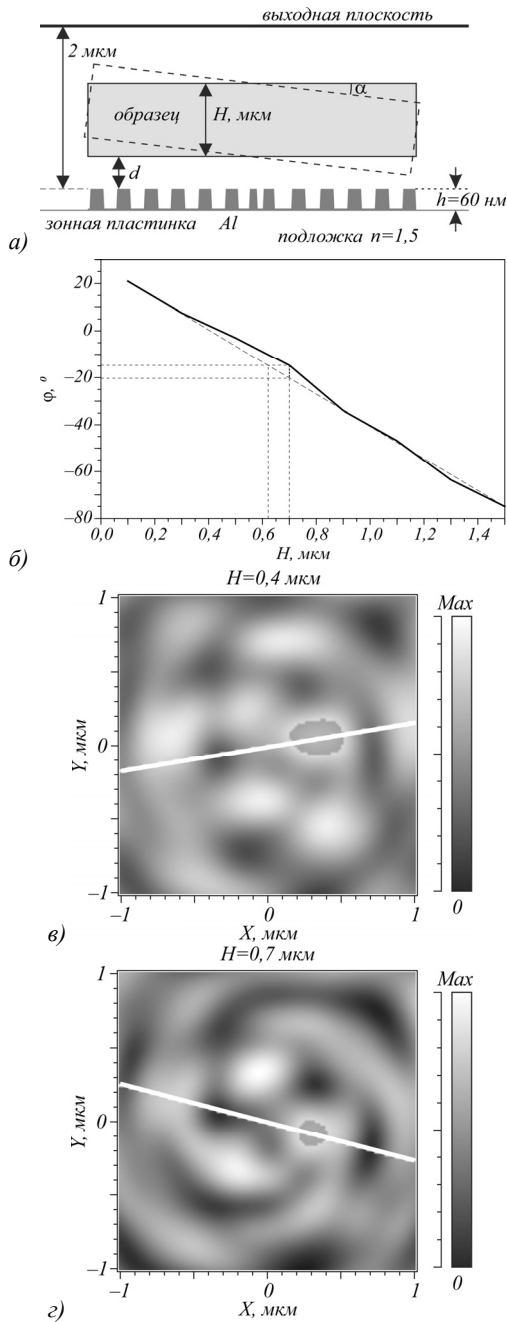


Рис. 3. Схема моделирования (а), зависимость угла поворота максимумов  $\varphi$  от толщины пластины  $T$ , расположенной между ЗП и плоскостью наблюдения (CCD-камерой) (б), интенсивность в плоскости наблюдения при толщине пластины  $H = 0,4$  мкм (в) и  $H = 0,7$  мкм (з)

Моделирование показало, что угол поворота интенсивности  $\varphi$  составляет  $-68,5^\circ$  при увеличении толщины пластины на 1 мкм (рис. 3б), то есть приблизительно в 2 раза меньше, чем в случае на рис. 2а. Это объясняется тем, что при выбранном показателе преломления пластины увеличение эйконала (фазовый набег) происходит вдвое медленнее, чем растет толщина пластины. Вращение с увеличением толщины пластины происходит в противоположную сторону (рис. 3б) по сравнению со случаем увеличения расстояния до плос-

кости наблюдения (рис. 2а). Причина этого в том, что при попадании лучей в среду с большим показателем преломления угол лучей к оптической оси становится меньше, фокусное расстояние  $f$  ЗП эффективно увеличивается на величину  $H$ , и скорость вращения максимумов интенсивности замедляется (4). Поскольку скорость вращения в среде ниже, вращение пучка на расстоянии  $z=2$  мкм (рис. 3а) тоже меньше. Чем толще пластина, тем меньше будет угол поворота пучка на том же расстоянии. Это эффект от вращения в обратном направлении (по часовой стрелке). Если же зафиксировать толщину пластины и перемещать ее вдоль оси  $z$  между ЗП и CCD-камерой, то максимумы интенсивности сохраняют свою ориентацию в пространстве и не вращаются.

Для оценки качества измерения существует два критерия – чувствительность метода и точность измерения. Оценка угла поворота максимумов интенсивности не по координатам одного отсчета с максимальной интенсивностью, а за счет усреднения координат отсчетов, интенсивность которых выше определенного порога (в данном случае 0,8), имеет очень высокую чувствительность. Это продемонстрировано в табл. 1. В данном случае разрешение в плоскости наблюдения вдоль осей  $X$  и  $Y$  совпадало с сеткой разбиения и было равно  $\lambda/30=0,0177$  мкм. В табл. 1 показаны полученные углы поворота  $\varphi$  для разной толщины пластины  $H$ .

Из табл. 1 видно, что при данных параметрах моделирования изменение толщины на 1 нм нельзя определить. Причина в том, что шаг сетки моделирования по оси  $z$  также составлял 0,0177 мкм. То есть изменение толщины пластины может не привести к изменению сигнала для моделирования, поскольку шаг сетки грубее. Однако показано, что изменение толщины на  $\Delta H=3$  нм может быть обнаружено данным методом. Для оценки точности измерения толщины пластины было рассчитано СКО разности между полученным графиком и прямой линией, которую этот график максимально повторяет (рис. 2б, пунктирная линия). СКО получилось равным  $\sigma=2,39^\circ$ , то есть среднеквадратичная ошибка определения толщины ожидается равной  $\pm 35$  нм.

Табл. 1. Углы поворота, измеренные с точностью до третьего знака после запятой для разных толщин пластины

| Толщина $H$ , мкм | $\varphi$ , $^\circ$ |
|-------------------|----------------------|
| 0,74              | 91,7415              |
| 0,72              | 94,5576              |
| 0,71              | 96,027               |
| 0,705             | 97,374               |
| 0,702             | 98,2742              |
| 0,701             | 98,2742              |

### 3. Измерение угла поворота пластины

В этом параграфе покажем, что оптический сенсор со спиральной ЗП может определять угол поворота

тонкой прозрачной пластины, помещенной между ЗП и CCD-камерой. Пластина поворачивается вокруг оси, пересекающей оптическую ось под углом 90 градусов (рис. 3а). На рис. 4 показана зависимость поворота трех максимумов интенсивности от поворота пластины на угол  $\alpha$ . Для получения данной зависимости толщина пластины была взята  $H=0,5$  мкм, показатель преломления  $n=1,5$ , угол поворота пластины менялся в диапазоне от 0 до 7 градусов. Для того, чтобы пластина при таком повороте не выходила из пучка, расстояние между пластиной и ЗП было увеличено до  $d=0,6$  мкм.

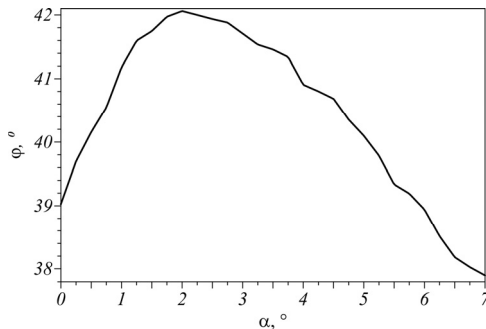


Рис. 4. Зависимость угла поворота трех максимумов интенсивности  $\phi$  от угла поворота пластины  $\alpha$ . Оба угла измерены в градусах

Из рис. 4 следует, что поворот пластины, с одной стороны, влияет на точность определения ее толщины. Изменение угла  $\alpha$  в диапазоне от 0 до 7° влечет поворот максимумов интенсивности на угол  $\phi$  в 3°, что соответствует внесению максимальной ошибки в определение толщины  $\pm 44$  нм. Но, с другой стороны, рис. 4 демонстрирует, что оптический сенсор может измерять углы наклона пластины. Если толщина пластины известна и нужно определить угол её поворота, то график на рис. 4 показывает, что данным методом можно определять угол наклона в диапазоне от нуля до 3° с точностью 0,1°, или в диапазоне от 3° до 7° с той же точностью.

#### 4. Измерение показателя преломления тонкой пленки

Понятно, что не только изменение толщины пластины приводит к повороту трехлепесткового пучка, так как вносит в пучок дополнительную разность хода, но и изменение показателя преломления пластины также будет вносить дополнительную разность хода и приводить к повороту трех максимумов интенсивности в пучке. Поэтому данный оптический сенсор может определять показатель преломления тонкой пленки или жидкости в кювете, если толщина пленки или кюветы с жидкостью известны. На рис. 5 показана зависимость угла поворота максимумов интенсивности  $\phi$  от показателя преломления  $n$  в диапазоне от 1 до 1,5 при толщине пластины  $H=0,5$  мкм.

Из рис. 5 следует, что диапазон изменения угла  $\phi$  составляет 141,7° при изменении показателя прелом-

ления на 1. Из рис. 5 также следует, что если показатель преломления увеличивается на 0,1...0,2, то фокусное расстояние ЗП почти не меняется и скорость вращения лепестков интенсивности примерно равна их скорости вращения без пластины (рис. 2). Но так как скорость света внутри пластины меньше, угол поворота пучка в выходной плоскости меньше по отношению к случаю, когда пластина отсутствует. Таким образом, вращение становится по часовой стрелке (рис. 5), в отличие от случая без пластины (рис. 2), где наблюдается вращение против часовой стрелки. Если и далее увеличивать показатель преломления, фокусное расстояние ЗП увеличивается и скорость вращения замедляется. Поэтому графики для случая  $n > 1,5$  на рис. 5 не приведены. Зависимость, изображенная на рис. 5, не является прямой линией (пунктирная линия на рис. 5) составляет 2,63°, что эквивалентно точности в определении показателя преломления  $n \pm 0,019$ . Но чувствительность данного метода выше, так как метод позволяет определять минимальные измерения показателя преломления, равные  $\Delta n = 1 / 141 = 0,007$ .

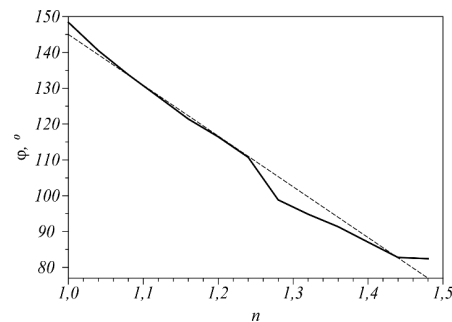


Рис. 5. Зависимость угла поворота максимумов интенсивности  $\phi$  от показателя преломления пластины  $n$

#### 5. Сравнение моделирования с экспериментом

С помощью электронной литографии с технологией прямой записи и последующего травления в плазме была изготовлена ЗП ( $m=2$ ) с диаметром 12 мкм и фокусным расстоянием ( $f=\lambda=0,532$  мкм) в тонкой пленке (60 нм) алюминия, нанесенного на подложку из кремния. Оптическая схема эксперимента включает в себя: лазер, поляризатор P1, микрообъектив MO1, фокусирующий свет на ЗП, и микрообъектив MO2, отображающий фокусную плоскость на сенсор CCD-камеры (рис. 6). Свет из лазера MGL-F-532-700 с длиной волны  $\lambda=0,532$  мкм проходит через поляризатор P1 с линейной поляризацией и фокусируется 4-кратным объективом (MO1) Olympus RMS4X на исследуемой ЗП. Изображение прошедшего пучка строится с помощью 100-кратного объектива Nikon ( $NA=0,95$ ) на сенсоре CCD-камеры UC MOS10000KPA. Камера смещалась вдоль оптической оси для регистрации вращения лепестков интенсивности.

Изображения маски в тонкой пленке хрома (45 нм) (а) и изготовленной ЗП в тонкой пленке алюминия (б), полученные с помощью растрового электронного микроскопа, приведены на рис. 7.

На рис. 8 показаны два распределения интенсивности, полученные с помощью CCD-камеры после прохождения через ЗП на расстояниях  $z = 1,3$  мкм (а) и  $z = 1,7$  мкм (б). Видно, что два максимума интенсивности поворачиваются примерно на  $91^\circ$  на расстоянии 0,4 мкм. Скорость вращения, полученная экспериментально, равна примерно  $227,5^\circ/\mu\text{км}$ . Это больше, чем скорость вращения, полученная при моделировании (рис. 2а):  $211^\circ/\mu\text{км}$ . Разница в расчетах (около 7%) объясняется погрешностью при сдвиге CCD-камеры вдоль оптической оси, эта погрешность может достигать примерно 0,1...0,2 мкм.

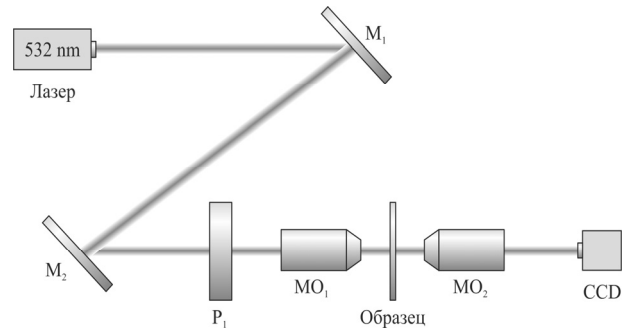


Рис 6. Схема эксперимента. Лазер – MGL-F-532-700 ( $\lambda = 0,532$  мкм), M1, M2 – зеркала, P1 – линейный поляризатор, MO1 – 4× объектив (Olympus RMS4X), MO2 – 100× объектив (Nikon 100x/0,95), CCD – CCD-камера (UCMOS10000KPA)

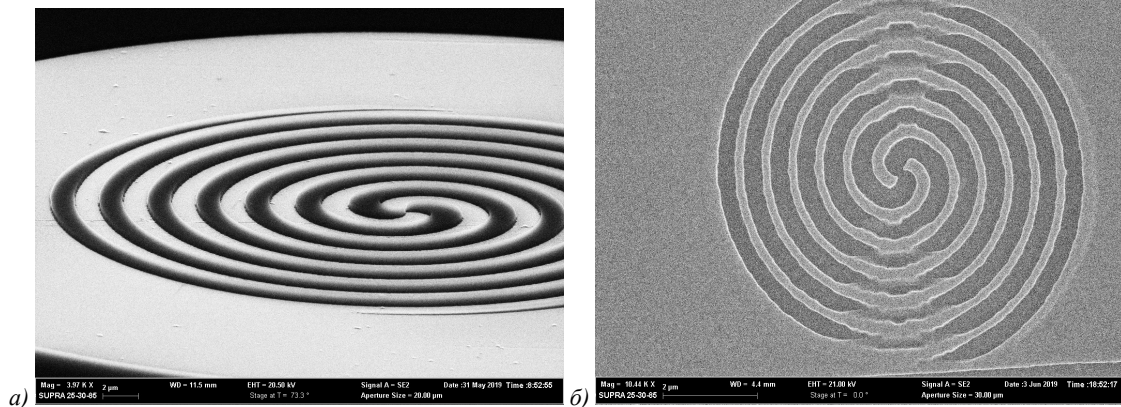


Рис. 7. Изображения РЭМ маски в хrome (а) и изготовленной ЗП второго порядка в алюминиевой пленке (б)

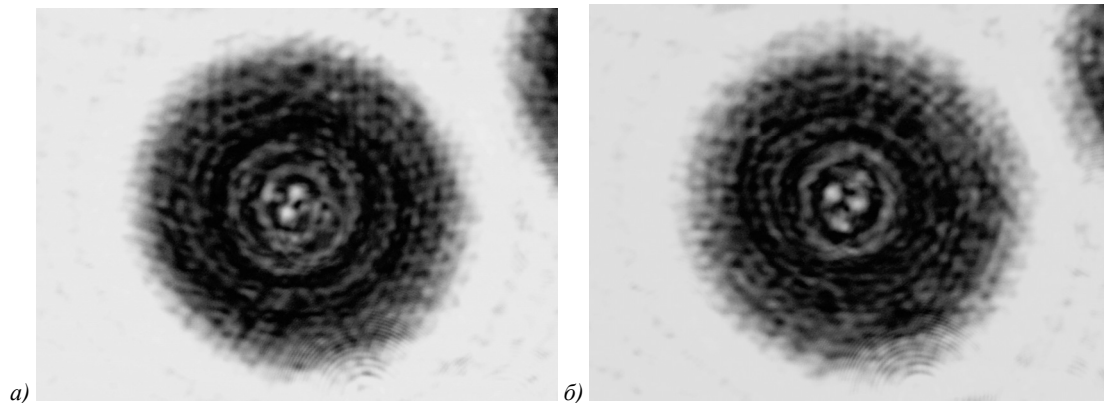


Рис. 8. Экспериментально полученные распределения интенсивности света, прошедшего через ЗП второго порядка на расстояниях:  $z = 1,3$  мкм (угол поворота  $\varphi = 66,5^\circ$ ) (а),  $z = 1,7$  мкм ( $\varphi = 157,5^\circ$ ) (б)

### Заключение

На основе FDTD-метода промоделирована работа простого оптического сенсора для определения сразу нескольких величин: смещения, толщины или рельефа, угла поворота и показателя преломления. Лазерные вращающиеся пучки, в сечении которых, как правило, два лепестка, уже давно используются для увеличения продольного разрешения в оптических микроскопах. Двухлепестковая функция рассеяния точки позволяет определить трехмерное положение отдельной молеку-

лы или квантовой точки с точностью 10 нм – 20 нм [13, 16]. При этом вращающийся пучок генерировался с помощью модулятора света. С целью миниатюризации оптического сенсора в данной работе предлагается использовать микроэлемент в виде спиральной бинарной амплитудной зонной пластинки третьего порядка с высокой числовой апертурой и размером всего  $8 \times 8$  мкм, выполненной в тонкой пленке алюминия толщиной 60 нм. Показано, что при смещении примерно на 2 мкм от поверхности ЗП трехлепестковое распределение интенсивности поворачивается почти линейно примерно

на 260 градусов (рис. 2а). В подобных работах [13, 18] достигнута скорость вращения максимумов интенсивности только 130°/мкм. Показано также, что если между ЗП и плоскостью регистрации (CCD-камера) расположить тонкую пластинку или пленку толщиной от 200 нм до 1400 нм, то изменение толщины пленки можно определить по углу поворота трехлепестковой интенсивности (рис. 3б) с точностью 35 нм, а минимальное обнаруживаемое изменение толщины пленки равно 3 нм. Показано, что данный оптический сенсор (рис. 1) позволяет также определять показатель преломления тонких пленок, если известна их толщина. При этом точность определения показателя преломления равна 0,019. Оптический сенсор может также определять угол поворота тонкой прозрачной пластинки на угол в несколько градусов. При этом точность определения угла поворота пластины по измерению угла поворота трехлепестковой интенсивности равна около 0,1 градуса. Хотя данный оптический сенсор не позволяет достигать рекордных значений точности измерения указанных величин, но он простой в изготовлении и использовании, а также отличается своей многофункциональностью.

#### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 23-12-00236) (моделирование), а также по государственному заданию НИЦ «Курчатовский институт» (разработка программного обеспечения).

#### **References**

- [1] Abramochkin E, Volostnikov V. Spiral-type beams. *Opt Commun* 1993; 102(3-4): 336-350. DOI: 10.1016/0030-4018(93)90406-u.
- [2] Abramochkin E, Losevsky N, Volostnikov V. Generation of spiral-type laser beams. *Opt Commun* 1997; 141(1-2): 59-64. DOI: 10.1016/S0030-4018(97)00215-0.
- [3] Schechner YY, Piestun R, Shamir J. Wave propagation with rotating intensity distributions. *Phys Rev E* 1996; 54(1): R50. DOI: 10.1103/PhysRevE.54.R50.
- [4] Paakkonen P, Lautanen J, Honkanen M, Kuittinen M, Turunen J, Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA, Friberg AT. Rotating optical fields: Experimental demonstration with diffractive optics. *J Mod Opt* 1998; 45(11): 2355-2369. DOI: 10.1080/09500349808231245.
- [5] Daria VR, Palima DZ, Glückstad J. Optical twists in phase and amplitude. *Opt Express* 2011; 19(2): 476-481. DOI: 10.1364/OE.19.000476.
- [6] Bekshaev AYa, Soskin MS, Vasnetsov MV. Angular momentum of a rotating light beam. *Opt Commun* 2005; 249(4-6): 367-378. DOI: 10.1016/j.optcom.2005.01.046.
- [7] Greengard A, Schechner YY, Piestun R. Depth from diffracted rotation. *Opt Lett* 2006; 31(2): 181-183. DOI: 10.1364/OL.31.000181.
- [8] Pavani SRP, Piestun R. High-efficiency rotating point spread functions. *Opt Express* 2008; 16(5): 3484-3489. DOI: 10.1364/OE.16.003484.
- [9] Litvin IA, Dudley A, Forbes A. Poynting vector and orbital angular momentum density of superpositions of Bessel beams. *Opt Express* 2011; 19(18): 16760-16771. DOI: 10.1364/OE.19.016760.
- [10] Rop R, Dudley A, Lopez-Mariscal C, Forbes A. Measuring the rotation rates of superpositions of higher-order Bessel beams. *J Mod Opt* 2012; 59(3): 259-267. DOI: 10.1080/09500340.2011.631714.
- [11] Kotlyar VV, Khonina SN, Skidanov RV, Soifer VA. Rotation of laser beams with zero of the orbital angular momentum. *Opt Commun* 2007; 274(1): 8-14. DOI: 10.1016/j.optcom.2007.01.059.
- [12] Dorrah AH, Zamboni-Rached M, Mojahedi M. Controlling the topological charge of twisted light beams with propagation. *Phys Rev A* 2016; 93(6): 063864. DOI: 10.1103/physreva.93.063864.
- [13] Backlund MP, Lew MD, Backer AS, Sahl SJ, Grover G, Agrawal A, Piestun R, Moerner WE. The double-helix point spread function enables precise and accurate measurement of 3D single-molecule localization and orientation. *Proc SPIE* 2013; 8590: 85900L. DOI: 10.1117/12.2001671.
- [14] Li H, Yun X, Zhang Y, Wang F, Huang W. Optimization of Fresnel-zones-based Double Helix Point Spread Function and measurement of particle diffusion coefficient. *Opt Commun* 2022; 502: 127411. DOI: 10.1016/j.optcom.2021.127411.
- [15] Jin C, Zhang J, Guo C. Metasurface integrated with double-helix point spread function and metalens for three-dimensional imaging. *Nanophotonics* 2019; 8(3): 451-458. DOI: 10.1515/nanoph-2018-0216.
- [16] Volostnikov VG, Vorontsov EN, Kotova SP, Losevsky NN, Prokopova DV, Razueva EV, Samagin SA. Generation of two-lobe light fields with a rotating intensity distribution under propagation for single emitter spectroscopy. *EPJ Web of Conferences* 2016; 132: 02012. DOI: 10.1051/epjconf/201713202012.
- [17] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG, Schulz S, O'Faolain L. Two-petal laser beam near a binary spiral axicon with topological charge 2. *Opt Laser Technol* 2019; 119: 105649. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105649.
- [18] Kozlova ES, Stafeev SS, Podlipnov V, Fomchenkov S, Kotlyar VV. Theoretical and experimental study of spiral zone plates in aluminum thin film. *2021 Int Conf on Information Technology and Nanotechnology (ITNT) 2021: 1-4*. DOI: 10.1109/ITNT52450.2021.9649231.

#### **Сведения об авторах**

**Налимов Антон Геннадьевич**, 1980 года рождения, окончил Самарский государственный аэрокосмический университет в феврале 2003 года по специальности «Физика». Окончил очную аспирантуру по специальности 01.04.05 «Оптика» в 2006 году. Работает на кафедре технической кибернетики в Самарском университете в должности доцента, в ИСОИ, НИЦ «Курчатовский институт» в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук, соавтор 200 работ и 3 патентов. E-mail: [anton@ipsiras.ru](mailto:anton@ipsiras.ru)

**Козлова Елена Сергеевна**, 1989 года рождения. В 2011 году окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладная математика

и информатика». Кандидат физико-математических наук с 2014 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений ИСОИ, НИЦ «Курчатовский институт» и по совместительству ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы. E-mail: [kozlova.elena.s@gmail.com](mailto:kozlova.elena.s@gmail.com)

**Стафеев Сергей Сергеевич**, 1985 года рождения. В 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладная математика и физика». Доктор физико-математических наук с 2022 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт». Область научных интересов: дифракционная оптика, разностное решение уравнений Максвелла, оптика ближнего поля. E-mail: [sergey.stafeev@gmail.com](mailto:sergey.stafeev@gmail.com) ORCID: 0000-0002-7008-8007.

Сведения об авторе **Котляр Виктор Викторович**, см. стр. 12 этого номера.

**Подлипов Владимир Владимирович**, 1987 года рождения, инженер НИЛ-35 Самарского национального исследовательского университета, научный сотрудник лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт». Область научных интересов: математическое моделирование, электронно-лучевая литография, оптимизация процедур травления в микроэлектронике, дифракционная оптика и методы обработки и контроля поверхностей. E-mail: [podlipnovvv@ya.ru](mailto:podlipnovvv@ya.ru)

---

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 9 января 2024 г. Окончательный вариант – 13 марта 2024 г.

---

---

# Optical measurement of characteristics of thin films using a spiral zone plate

A.G. Nalimov<sup>1,2</sup>, E.S. Kozlova<sup>1,2</sup>, S.S. Stafeev<sup>1,2</sup>, V.V. Kotlyar<sup>1,2</sup>, V.V. Podlipnov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute, NRC “Kurchatov Institute”, 443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

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

## Abstract

In this work we propose a method for measuring physical characteristics of thin samples (thin films), including thickness, refractive index and tilt by moving the observation plane. The measurements are made utilizing a vortex spiral zone plate, which forms three intensity maxima that rotate when moving along optical axis. The error in measuring the tilt of a sample is a fraction of a degree, and the error in measuring its thickness is less than 5 nm. By the numerical simulation, three intensity maxima are shown to be formed after a metalens, rotating in space with an angular velocity of 136°/μm, which is almost twice as high as was reported in similar works.

**Keywords:** spiral zone plate, thickness sensor, shift sensor.

**Citation:** Nalimov AG, Kozlova ES, Stafeev SS, Kotlyar VV, Podlipnov VV. Optical measurement of characteristics of thin films using a spiral zone plate. *Computer Optics* 2025; 49(1): 21-29. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1493.

**Acknowledgements:** The work was partly funded by the Russian Science Foundation under grant #23-12-00236 (Section "Numerical simulation") and NRC “Kurchatov Institute” within a government project (Sections “Introduction” and “Conclusion”).

---

## Authors' information

**Anton Gennadyevich Nalimov** (b. 1980), graduated from Samara State Aerospace University in February, 2003. Finished postgraduate study 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, NRC Kurchatov Institute, Samara, Russia. Candidate in Physics and Mathematics, coauthor of 200 papers and 3 inventions. E-mail: [anton@ipsiras.ru](mailto:anton@ipsiras.ru)

**Elena Sergeevna Kozlova**, (b. 1989) received Master's degree in Applied Mathematics and Informatics in Samara State Aerospace University (2011). She received her PhD in 2014. She is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute, NRC Kurchatov Institute and assistant of Computer Science department at Samara National Research University. Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: [kozlova.elena.s@gmail.com](mailto:kozlova.elena.s@gmail.com)

**Sergey S. Stafeev** (b. 1985) received Master's degree in Applied Mathematics and Physics in Samara State Aerospace University (2009). He received his DrSc degree in 2022. He is a researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute, NRC Kurchatov Institute. Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: [sergey.stafeev@gmail.com](mailto:sergey.stafeev@gmail.com) ORCID: 0000-0002-7008-8007.

**Victor Victorovich Kotlyar** is a head of Laboratory at the Image Processing Systems Institute, NRC Kurchatov Institute 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 560 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)

**Vladimir Vladimirovich Podlipnov**, (b.1987), engineer at NIL-35 of Samara National Research University, researcher at the Laboratory of Micro- and Nanotechnologies of the Image Processing Systems Institute, NRC Kurchatov Institute. Research interests: mathematical modelling, electron beam lithography, optimization of etching processes in microelectronics, diffractive optics and surface treatment and control methods. E-mail: [podlipnovvv@ya.ru](mailto:podlipnovvv@ya.ru)

---

*Received January 9, 2024. The final version – March 13, 2024.*

---