## МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ТАВРИЧЕСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ВЕРНАДСКОГО

# СОКОЛЕНКО БОГДАН ВАЛЕНТИНОВИЧ

УДК 535.012.21

## ЭВОЛЮЦИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СИНГУЛЯРНОСТЕЙ В ПАРАКСИАЛЬНЫХ ПУЧКАХ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ ОРТОГОНАЛЬНО ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ ОДНООСНОГО КРИСТАЛЛА

01.04.05 оптика

# ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание научного звания кандидата физико-математических наук

Симферополь 2014

Диссертация является рукописью

# Работа выполнена в *Таврическом национальном университете им. В.И.* Вернадского

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, Рыбась Александр Федорович, Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского, доцент кафедры общей физики

Официальные оппоненты:

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г. в \_\_\_\_\_\_ час на заседании диссертационного совета Д 52.051.02 при Таврическом национальном университете им. В.И. Вернадского по адресу: **295007, Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4** 

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Таврического национального университета им. В.И. Вернадского по адресу: **295007**, Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_ 2014 г.

И.О. Ученого секретаря Диссертационного совета Д 52.051.02, доктор физико-математических наук

А.В. Яценко

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Диссертационная работа относится к сингулярной оптике [1], в частности к сингулярной оптике однородных анизотропных сред [2]. Сингулярная оптика имеет дело со световыми пучками, сформированными таким образом, что они переносят оптические вихри (винтовые и краевые дислокации волнового фронта), а также поляризационные сингулярности [3, 4]. Причем оптические вихри образуют в пучке особые распределения интенсивности, которые позволяют захватывать и транспортировать микрочастицы, а также устанавливать их взаимную ориентацию.

В работе исследуются пучки, переносящие скалярные и векторные сингулярности, распространяющиеся в одноосных кристаллах перпендикулярно к оптической оси и под малым наклоном к перпендикуляру к оптической оси. Теоретически и экспериментально проанализирована динамика сингулярностей, а также их основные особенности поведения. В частности, исследуется ранее не рассматриваемый случай распространения лазерных пучков под малыми углами к перпендикуляру к оптической оси кристалла, в процессе чего варьируются параметры и характеристики пучка.

Столь важные особенности поведения сингулярных пучков в анизотропных средах существенны, например, для оптических пинцетов и устройств микроскопии [5\*]. Закрученные линии тока приводят к тому, что пучок переносит орбитальный угловой момент. В простейшем скалярном случае этот момент пропорционален топологическому заряду вихря. Кроме того, наличие углового момента пучка играет ключевую роль в устройствах скрытой передачи и обработки сверхплотных массивов информации.

Ранее рассмотренные физические механизмы формирования сложных векторных полей в кристаллах предполагали трансляцию однородно поляризованных пучков вдоль оптической оси кристалла или под небольшим углом к ней. В нашем же случае, вращение кристалла вокруг перпендикуляра к оптической оси позволяет задавать требуемые конфигурации поляризационных сингулярностей в поле после кристалла. Таким образом, вопрос формирования и управления оптическими вихрями является актуальной проблемой современной оптики.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа выполнялась на кафедре общей физики Таврического национального университета им. В.И. Вернадского в рамках научно-исследовательских работ по проектам Министерства образования Украины, зарегистрированных в Укр. ИНТЭИ: №0100U001363 «Дислокационные реакции в непараксиальных возмущённых «Процессы рождения, лазерных пучках в области фокуса», №0103U001227 уничтожения и эволюции оптических вихрей в неоднородных анизотропных средах», №0106U003189 «Структурные превращения стабилизация И квазимонохроматических сингулярных пучков в оптических волокнах и кристаллах», №0109U002370 «Конверсия оптических вихрей В хиральных фотоннокристаллических волокнах с управляемыми запрещенными спектральными зонами». В рамках этих проектов диссертантом были сформулированы экспериментальные принципы исследования поведения параксиальных пучков, распространяющихся в одноосных кристаллах, проведены аналитические исследования преобразованных

кристаллами этих полей, проведено компьютерное моделирование и экспериментальная проверка полученных результатов.

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертационной работы – выявить основные физические процессы, ответственные за преобразование структуры поляризационных и фазовых сингулярностей в пучках, распространяющихся перпендикулярно оптической оси кристалла, а также при малом наклоне от перпендикуляра.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи исследования:

1. Провести аналитический обзор литературы в международных изданиях по тематике распространения световых волн в одноосных кристаллах. Выявить основные недоработки в этих исследованиях.

2. Найти решение векторного параксиального уравнения для комплексных амплитуд собственных мод параксиальных пучков, распространяющихся через анизотропную среду почти перпендикулярно к оптической оси.

3. Экспериментально проанализировать фазовую и поляризационную структуру пучков с круглым и эллиптическим поперечным сечением. Установить особенности взаимодействия сингулярных световых пучков с анизотропной средой.

4. Теоретически и экспериментально проанализировать процессы, связанные с преобразованием фазовых поляризационных сингулярностей в системе из двух вращающихся кристаллов.

5. Теоретически и экспериментально проанализировать процессы возникновения резких всплесков орбитального углового момента в сингулярных пучках с эллиптичным поперечным сечением, распространяющихся перпендикулярно оптической оси.

6. Экспериментально проанализировать фазу электромагнитной волны, переносящей оптический вихрь, прошедшую тонкую изотропную пластинку с определенной геометрией поверхности.

**Объект исследования** – электромагнитные сингулярные пучки, распространяющиеся в анизотропных средах.

**Предмет исследования** – фазовые и поляризационные сингулярности, переносимые электромагнитными пучками с круглым и эллиптичным сечением в одноосных анизотропных средах.

Методы исследования, используемые в работе, базируются на общей теории сингулярной оптики, стандартных методах векторного и скалярного потенциала векторного параксиального уравнения. В основе теоретического анализа и экспериментальных исследований поляризационных характеристик заложены вычисления и измерения параметров Стокса для полей на выходе из кристалла, а также интерферометрический метод анализа фаз сингулярных пучков, прошедших анизотропный кристалл.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что:

1. Впервые найдены решения векторного параксиального волнового уравнения для пучков, распространяющихся под углом к перпендикуляру к оптической оси одноосного кристалла, а оптический вихрь смещен относительно оси пучка.

2. Теоретически и экспериментально показано, что эволюция сингулярного пучка со смещенным оптическим вихрем различна в двух случаях: а) оптический

вихрь на входе вращается, в то время как оптическая ось кристалла фиксирована; б) исходный оптический вихрь строго зафиксирован, в то время как оптическая ось кристалла вращается.

3. Впервые, теоретически и экспериментально показано, что орбитальный угловой момент сингулярного пучка на выходе из одноосного кристалла имеет ярко выраженные всплески, когда длина кристалла изменяется в пределах длины волны падающего света.

4. Впервые теоретически и экспериментально показано, что кристалл способен генерировать единичные оптические вихри и их массив даже если исходный пучок не имеет фазовых поляризационных сингулярностей. Вращение оптической оси кристалла позволяет управлять формой и конфигурацией массива в циркулярно поляризованных компонентах сингулярного пучка.

5. Впервые экспериментально и теоретически произведен анализ траекторий и фаз сингулярных пучков после прохождения тонких пленок с толщиной менее длины волны излучения He-Ne лазера, предложена модель оптического вихревого сканирующего микроскопа.

**Практическое значение полученных результатов.** Среди наиболее важных результатов, стоит отметить следующие:

1. В работе показана возможность генерации оптических вихрей с единичным топологическим зарядом даже в случае слабого отклонения пучка от перпендикуляра к оптической оси.

2. В работе показана возможность управления положением единичного оптического вихря при вращении оси кристалла.

3. В работе показано, что подбором величины эллиптичности исходного пучка и длины кристалла можно получать гигантские значения орбитального углового момента.

4. В работе показана возможность генерации оптических вихрей при распространении гауссова пучка под малыми углами к перпендикуляру к оптической оси одноосного кристалла, а также возможность управления параметрами сингулярного пучка посредством наклона и поворота оси кристалла.

5. Показано практическое применение важнейших особенностей сингулярных пучков на основе модели оптического вихревого сканирующего микроскопа с возможностями, значительно превосходящими классические конструкции оптических микроскопов.

Достоверность научных результатов исследования поведения сингулярных пучков в анизотропной среде одноосных кристаллов, а также изучения взаимосвязи параметров световых пучков, анизотропной среды и их корреляции, обеспечена результатами экспериментальных измерений и данными компьютерного моделирования с применением современных методов анализа оптических полей и интерферометрии.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 17-ти научных работах, в том числе 8-ми статьях, 9-ти тезисах международных конференций, перечень которых приведен в списке использованной литературы.

**Личный вклад автора** в выполненной работе заключается в проведении экспериментальных исследований [1\*, 3\*-7\*], обработке полученных результатов

[3\*, 4\*], расчета и моделирования физических процессов при постановке задачи исследования и экспериментального их воплощения [6\*, 8\*]. В работах, опубликованных с соавторами, проведена подготовка и должное оформление полученных результатов исследования [2\*, 5\*,7\*]. Работы [9\*-17\*] подготовлены соискателем самостоятельно при постановке задач проф. А.В. Воляром.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: IV International Conference "Singular Optics: Fundamentals and applications" (2008, Алушта, Украина), International Conference "Correlation Optics" (2009, 2011, 2013 Черновцы, Украина), The 12<sup>th</sup> International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science - SPO (2011, Киев, Украина), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (2012, Москва, Россия), V International Conference "Singular Optics" (2012, Севастополь, Украина), международный научный семинар молодых ученых "Optics and optical engineering" (2012, Севастополь, Украина).

Результаты работы так же докладывались на семинарах кафедры общей физики Таврического национального университета им. В.И. Вернадского и в институте физики Вроцлавского политехнического института (Польша).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из вступления, пяти разделов, выводов и списка цитируемой литературы (125 позиций). Полный объем работы – 160 с.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖИМОЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показана актуальность исследований, их связь с научными программами и направлениями исследований на кафедре Общей физики Таврического национального университета им. В.И. Вернадского, обоснована научная новизна, важность полученных результатов их применения на практике, приведены сведения о личных достижениях автора, сформулированы цели, задачи исследований.

B проведен аналитический обзор литературы первой главе ПО теме диссертационной работы рассмотрены стандартные И методы анализа распространения и преобразования сингулярных пучков, распространяющихся перпендикулярно оптической оси; в частности, рассмотрен стандартный подход на основе поверхностей Френеля, для пучков, распространяющихся перпендикулярно к оптической оси. В соответствии с ним пучок не расщепляется на две части различной формы и направления, а изменяет лишь фазовые и групповые скорости. С другой стороны, недавно было показано, что стандартный параксиальный гауссов пучок все же расщепляется на две части [5]. Детальный анализ показал, что обыкновенный пучок не меняет своей формы поперечного сечения, в то время как необыкновенный пучок эллиптически деформируется. Величина деформации поперечного сечения определяется величиной двулучепреломления кристалла. Такое рассмотрение было проведено только лишь для случая цилиндрически симметричных пучков в исходной плоскости.

Как правило, стандартное описание процесса распространения пучка основано на методе спектральных интегралов [5, 6]. В то же время, оказывается более удобным функциональный метод решения системы уравнений [5]. Для функционального описания наклонных пучков в кристалле был частично использован метод комплексных амплитуд Киселева [7] в сочетании с методом Фэлсена [8].

Тем не менее, в их работах не были затронуты вопросы распространения несимметричных пучков в исходной плоскости со сдвинутым оптическим вихрем и наклоненной осью пучка относительно перпендикуляра к оптической оси кристалла.

Во второй главе анализируются решения системы параксиальных волновых уравнений как для случая осесимметричных, так и эллиптически деформированных пучков. В частности, были найдены решения данных уравнений для случая наклонных эллиптических пучков. Для решения уравнений использовался метод углов Эйлера (рис. 1). В параксиальном случае удается разбить дифференциальное уравнение на два независимые части:

$$\partial_x^2 \tilde{E}_x + \partial_v^2 \tilde{E}_x - 2ik_1 \partial_z \tilde{E}_x = 0 \tag{1}$$

$$\partial_x^2 \tilde{E}_y + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \partial_y^2 \tilde{E}_y - 2ik_2 \partial_z \tilde{E}_y = 0$$
 (2)

Решения данных уравнений для осесимметричного пучка В исходной плоскости записываются в виде:

$$\widetilde{E}_{x} = \left(\frac{x - i\xi y}{w_{o}\sigma_{o}} - ae^{-i\xi(\psi-\varphi)}\right)$$

$$\times \exp\left[-\left(x^{2} + y^{2}\right) / w_{o}^{2}\sigma_{o}\right] / \sigma_{o}$$

$$\widetilde{E}_{y} = \frac{i}{\sqrt{\sigma_{x}\sigma_{y}}} \left(\frac{x}{w_{e}\sigma_{x}} - i\xi \frac{y}{w_{e}\sigma_{y}} - ae^{-i\xi(\psi-\varphi)}\right)$$

$$\times \exp\left[-\frac{x^{2}}{w_{e}^{2}\sigma_{x}} - \frac{y^{2}}{w_{e}^{2}\sigma_{y}}\right]$$
(3)
(3)
(3)
(4)

где



Рис.1. Углы Эйлера применительно к наклонному пучку в кристалле;

где  $z_o = k_1 w_o^2 / 2$ ,  $z_x = k_2 w_e^2 / 2$ ,  $z_y = k_2 w_e^2 n_1^2 / 2n_2^2$ ,  $\sigma_o = 1 - iz / z_o$ ,  $\sigma_x = 1 - iz / z_x$ ,  $\sigma_y = 1 - iz / z_y$ , a-коэффициент смещения вихря,  $\xi = \pm 1 -$  величина топологического заряда, и  $W_o, W_e -$ радиусы перетяжек обыкновенного и необыкновенного пучков соответственно.

На рисунке 2 представлена типичная эллиптическая деформация необыкновенного пучка, в то время как обыкновенный пучок изменяет лишь масштаб по мере распространения в анизотропной среде. Полученная компьютерная модель хорошо согласуется с результатами, описанными в работах [5, 6].



Рис. 2. Эволюция обыкновенного  $E_o$  и необыкновенного  $E_e$  гауссовых пучков вдоль длины кристаллая z во вращающейся системе координат (x, y, z):  $n_1 = n_o = 2, n_2 = n_e = 2.5, w_x = w_y = w_0 = 50 \mu m$ 

Замечено, что по мере распространения пучка наблюдается деформация коноскопической картины (рис.3) [6\*].



Рис. 3. Коноскопические картины гауссова пучка во вращающейся системе координат (x, y, z):  $n_1 = n_o = 2, n_2 = n_e = 2.5, w_x = w_y = w_0 = 5 \mu m$ . Распространение перпендикулярно оси кристалла

Особенное внимание уделено рассмотрению двух случаев эволюции пучков со смещенным оптическим вихрем (рис.4). В первом случае (рис. 4.а) оптическая ось кристалла фиксирована в основной системе координат, связанной с наблюдателем, в то время как исходный смещенный вихрь вращается вокруг оси пучка. Во втором случае (рис. 4.б) вращение оптической оси кристалла происходит при неподвижном



Рис. 4. Схематическое представление прохождения пучка ортогонально оптической оси: (а) для первого случая, (б) для второго случая; (в) прецессия вихря в сечении пучка для случая одновременного вращения смещенного вихря в пучке и кристалла.

смещенном вихре. В первом случае одному полному обороту исходного вихря вокруг оси на угол  $\varphi = 0 \div 2\pi$  соответствует единичный оборот вихря после кристалла как в обыкновенном так и в необыкновенном пучках.

Второй случай более сложный. При фиксированном исходном вихре и повороте оптической оси кристалла, необыкновенный пучок совершает двойной оборот вокруг оси пучка. Если меняется как положение исходного вихря, так и положение оптической оси, то вихрь в необыкновенном пучке совершает сложное движение (рис. 4. в). В частности, вид таких траекторий представлен на рис.5. Через  $\Omega_c$  и  $\Omega_v$  обозначены угловые скорости вращения оптической оси кристалла и исходного вихря соответственно.



Рис.5. Основные типы траекторий вихря в плоскости z=2cm в кристалле при одновременном вращении вихря и оптической оси кристалла, при  $w_0 = 10 \, \mu m$ , a = 0.7

Для экспериментальной проверки данного явления была собрана установка (рис.6). Показано сложное движение, когда один поворот кристалла ассоциируется с двойным поворотом оптического вихря в необыкновенном пучке (рис. 7).



Рис. 6. Схема экспериментальной установки: Ls- He-Ne лазер,  $\lambda/4$  - четвертьволновая пластинка, H – компьютерно синтезированная голограмма, D – диафрагма, L – линза, Cr – кристалл, MO – микрообъектив.

Следует отметить, что на основе рассмотренных выше явлений могут быть построены довольно простые устройства для захвата, трансляции и взаимной ориентации частиц. Именно эта проблема рассмотрена в 3 главе.

Более сложный процесс одновременного наклона пучка и вращения оптической оси кристалла проанализирован в третьей главе. В этом случае решение системы уравнений записывается в виде:



Рис. 7. Траектория (а) вихря в необыкновенном пучке (b). – изображение выходного поля пучка,

$$\tilde{E}_{x} = \left(\frac{x - \alpha_{o}z\cos\psi - i\xi(y - \alpha_{o}z\sin\psi)}{w_{o}\sigma_{o}} - ae^{-i\xi(\psi - \varphi)}\right) \times \exp\left[-\left(X_{o}^{2} + Y_{o}^{2}\right)/w_{o}^{2}\sigma_{o} - f_{o}\right]/\sigma_{o} \quad (5)$$

$$\tilde{E}_{y} = \frac{i}{\sqrt{\sigma_{x}\sigma_{y}}} \left(\frac{x - \alpha_{x}z\cos\psi}{w_{e}\sigma_{x}} - i\xi\frac{y - \alpha_{y}z\sin\psi}{w_{e}\sigma_{y}} - ae^{-i\xi(\psi - \varphi)}\right) \times \exp\left[-\frac{X_{e}^{2}}{w_{e}^{2}\sigma_{x}} - \frac{Y_{e}^{2}}{w_{e}^{2}\sigma_{y}} - f_{e}\right] \quad (6)$$

Наиболее интересен случай наклонного распространения пучка со смещенным не осевым вихрем, т.е. когда задействованы все углы Эйлера (рис. 8). Картина эволюции пучка и вид вихревых траекторий в таком случае имеют резкие отличия. В частности, в лабораторных координатах траектории движения вихрей описывается уравнениями

$$x_{1} = x_{0} + (T_{1} - \alpha_{0} zB) \cos 2\psi + T_{2} \sin 2\psi$$
(7)

$$y_1 = y_0 - T_2 \cos 2\psi + (T_1 + \alpha_0 zB) \sin 2\psi$$
(8)

В необыкновенном пучке вихрь описывает круговую траекторию радиусом  $r_p = A \sqrt{(1+Z_x^2)(1+Z_y^2)}$  в то время как ее центр смещен относительно оси пучка и имеет координаты  $x_0^{(e)} = aw_0(2+Z_y^2+Z_x^2)/(1+Z_xZ_y)/2$ ,  $y_0^{(e)} = -\xi a w_0(Z_x+Z_y)/2$ .



Рис.8.Схематическое представление наклонного прохождения пучка через одноосный кристалл в случаях: (а) осевого вихря, (б) вихря со смещением от оси пучка на величину а.

Такая геометрия кристалла и пучка наиболее оптимальны для случая оптического редуктора, который представляет собой сочетание двух одноосных кристаллов разделенными четвертьволновой пластинкой. Оптические оси кристаллов способны независимо друг от друга вращаться с различными угловыми скоростями (рис.9).



Рис. 9. Схематическое представление оптического редуктора: (a), (b) вихревые пучки на входе и выходе из кристалла (компьютерный расчет производился для  $n_1 = 2.2, n_2 = 2.4, d_1 = 2 \text{ cm}, d_2 = 2.8 \text{ cm}, w_0 = 15 \mu m, a_o = 0.12 \text{ rad}, \Omega_1 / \Omega_2 = 1/3$ )

Траектории вихревых пучков описываются более сложными выражениями. Для о-о (обыкновенного - обыкновенного) пучка координаты вихря примут следующий вид:

$$x_{o-o} = 0 , y_{o-o} = \alpha_o (d_1 + d_2)$$
(9)

Положение о-е (обыкновенного - необыкновенного) пучка управляется поворотом второго кристалла на угол *Щ*:

$$x_{o-e} = \alpha_o d_2 \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_1 n_2} \cos 2\psi_2 , \qquad (10)$$

$$y_{o-e} = \alpha_o d_1 - \alpha_o d_2 \left( \frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1n_2} - \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_1n_2} \sin 2\psi_2 \right)$$
(11)

Координаты е-о (необыкновенного - обыкновенного) пучка также управляются поворотом первого кристалла на угол  $\psi_1$ :

$$x_{e-o} = \alpha_o d_1 \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_1 n_2} \cos 2\psi_1 , \qquad (12)$$

$$y_{e-o} = \alpha_o d_2 - \alpha_o d_1 \left( \frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1 n_2} - \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_1 n_2} \sin 2\psi_1 \right)$$
(13)

В свою очередь положение е-е (необыкновенного - необыкновенного) пучка определяется поворотом обоих кристаллов на углы  $\psi_1$  и  $\psi_2$  соответственно:

$$x_{e-e} = \alpha_o d_1 \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_1 n_2} \cos 2\psi_1 + \alpha_o d_2 \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_1 n_2} \cos 2\psi_2$$
(14)

$$y_{e-o} = -\alpha_o d_1 \left( \frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1n_2} - \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_1n_2} \sin 2\psi_1 \right) - \alpha_o d_2 \left( \frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1n_2} - \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_1n_2} \sin 2\psi_2 \right)$$
(15)

Анализ полученных выражений (9)–(15) показывает, что в случае изменений углов  $\psi_1 = \Omega_1 t$  и  $\psi_2 = \Omega_2 t$ , вихри в о-е и е-о пучках описывают замкнутые окружности вокруг точек  $x_0^{(o-e)} = 0$ ,  $y_0^{(o-e)} = \alpha_o d_1 - \alpha_o d_2 (n_1^2 + n_2^2)/2 n_1 n_2$  и  $x_0^{(e-o)} = 0$ ,  $y_0^{(e-o)} = \alpha_o d_2 - \alpha_o d_1 (n_1^2 + n_2^2)/2 n_1 n_2$  соответственно, таким образом угловые скорости пучков вдвое больше чем угловая скорость оптической оси кристалла:  $\Omega_{o-e} = 2\Omega_2$  и  $\Omega_{e-o} = 2\Omega_1$ . Гораздо сложнее описывает траекторию е-е пучок, участвующий одновременно в двух вращательных движениях. Форма этих движений напрямую зависит от соотношения угловых скоростей  $\Omega_1 / \Omega_2$ . Очевидно, центры всех



Рис. 10. Траектории прецессии вихрей в оптическом редукторе из двух кристаллов:  $n_1 = 2.3$ ,  $n_2 = 2.2$ ,  $d_1 = 1cm$ ,  $d_2 = 1.2 cm$ ,  $\alpha_0 = 0.16 rad$ ; для величин  $\Omega_1 / \Omega_2$ : a) 1/2, б) -1/2, в) -2/3; г) 2/3, цветами обозначены траектории: красным *o*-*e* пучок, синим – *e*-*o* пучок, черным – *e*-*e* пучок.

траекторий смещены относительно положения о-о пучка. На рис. 10. представлены траектории (а–г) для различных величин соотношения  $\Omega_1 / \Omega_2$ .

С целью экспериментального исследования траекторий пучков были выбраны два одноосных кристалла LiNbO<sub>3</sub>, установленные в независимо вращающиеся подвижные системы. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке (рис. 11).



Рис. 11. Схема экспериментальной установки: Ls – He-Ne лазер, λ/4 - четвертьволновая пластинка, H – голограмма, D – диафрагма, Cr<sub>1</sub> и Cr<sub>2</sub> – кристаллы LiNbO<sub>3</sub>, CCD – видеокамера. (а) – поле на входе, (б) – поле на выходе из системы

Задавая различные скорости вращения оптических осей кристаллов, можно получать довольно сложные траектории, которые позволяют локализовать и ориентировать микрочастицы в требуемой области наблюдения. В частности, экспериментальные результаты, приведенные на рисунке (рис. 12) дают хорошее согласование с теоретическими предпосылками.



Рис.12. Экспериментальные траектории вихревых пучков в оптическом редукторе: (a)  $\Omega_1 / \Omega_2 = 1/2$ , (b)  $\Omega_1 / \Omega_2 = -1/2$ : черные маркеры – соответствуют е-е пучку; синие – ое-пучку, и зеленые – ео-пучку.

Особый интерес представляет процесс распространения через кристалл пучков с эллиптической формой поперечного сечения, рассмотренный в четвертой главе.

**В четвертой главе** найдено решение для случая эллиптического пучка на входной грани кристалла, где циркулярно поляризованная только одна компонента пучка, скажем,  $E_+$  то  $E_-(z=0)=0$  при этом необходимо совпадение начальных параметров, а именно  $w_{xx} = w_{yx} = w_x$ ,  $w_{xy} = w_y$ , таким образом, имеем условие равенства волновых функций в исходной плоскости  $\Psi_E(x, y, z=0) = \Psi_H(x, y, z=0)$ :

$$E_{x}^{(m,n)} = \left(\frac{\sigma_{xx}^{*}}{\sigma_{xx}}\right)^{\frac{m}{2}} \left(\frac{\sigma_{xy}^{*}}{\sigma_{xy}}\right)^{\frac{n}{2}} H_{m}\left(\sqrt{2}\frac{x}{w_{x}|\sigma_{xx}|}\right) H_{n}\left(\sqrt{2}\frac{y}{w_{y}|\sigma_{xy}|}\right) \frac{1}{\sqrt{\sigma_{xx}\sigma_{xy}}} \exp\left(-\frac{x^{2}}{w_{x}\sigma_{xx}} - \frac{y^{2}}{w_{y}\sigma_{xy}}\right) e^{ik_{x}z} \quad (16)$$

$$E_{y}^{(m,n)} = \left(\frac{\sigma_{yx}^{*}}{\sigma_{yx}}\right)^{\frac{m}{2}} \left(\frac{\sigma_{yy}^{*}}{\sigma_{yy}}\right)^{\frac{n}{2}} H_{m}\left(\sqrt{2}\frac{x}{w_{x}|\sigma_{yx}|}\right) H_{n}\left(\sqrt{2}\frac{y}{w_{y}|\sigma_{yy}|}\right) \frac{1}{\sqrt{\sigma_{yx}\sigma_{yy}}} \exp\left(-\frac{x^{2}}{w_{x}\sigma_{yx}} - \frac{y^{2}}{w_{y}\sigma_{yy}}\right) e^{ik_{y}z} \quad (17)$$

где, H<sub>m,n</sub> – полином Эрмита. Расчет дает ряд уникальных распределений интенсивности (рис.13).



Рис.13. Преобразование распределения интенсивности в компоненте  $E_{+}$  вихревого пучка с n=0 и m=10 в кристалле с (а)  $n_x = 3$ ,  $n_y = 2$ , (б),  $w_x = 50 \ \mu m$ ,  $w_y = 30 \ \mu m$ .

Довольно удивительные результаты были получены при пропускании пучков с эллиптическим сечением через кристалл при его медленном нагревании. Расчет и эксперимент показали резкие всплески орбитального момента при медленном расширении в процессе изменения температуры.

Состояние вихря в каждой  $E_+$  и  $E_-$  компонентах может быть описано в виде векторных полей  $\psi_+ = \nabla_\perp E_+$  и  $\psi_- = \nabla_\perp E_-$  [3\*, 13], которые характеризуют локальное распределение фазы. Математическое описание основано на применении параметров, подобных параметрам Стокса для состояния поляризации пучка. Для случая параксиального приближения имеем:

$$\begin{cases} S_0^{(\pm)} = \left| \nabla_{\perp} E_{\pm} \right|^2 & S_1^{(\pm)} = \left| \partial_x E_{\pm} \right|^2 - \left| \partial_y E_{\pm} \right|^2 \\ S_2^{(\pm)} = \partial_x E_{\pm} \partial_y E_{\pm}^* + \partial_x E_{\pm}^* \partial_y E_{\pm} & S_3^{(\pm)} = i \left( \partial_x E_{\pm}^* \partial_y E_{\pm} - \partial_x E_{\pm} \partial_y E_{\pm}^* \right) \end{cases}$$
(18)

Деформация сердцевины вихря описывается нормализированным параметром  $S_3^{(\pm)}$  в виде:

$$\ell_{z}^{(\pm)} = \frac{i\left(\partial_{x}E_{\pm}^{*}\partial_{y}E_{\pm} - \partial_{x}E_{\pm}\partial_{y}E_{\pm}^{*}\right)}{\left|\nabla_{\perp}E_{\pm}\right|^{2}}$$
(19)

Распространяясь вдоль кристалла, эллиптически поляризованный гауссов пучок последовательно меняет состояние поляризации с право- циркулярной на левоциркулярную. Энергия также перераспределяется между этими компонентами. Периодические осцилляции, изображенные на графике (Рис.14, 15) указывают на конверсию в  $E_+$  и  $E_-$  компонентах эллиптического вихря.



Рис. 14. Периодическая конверсия эллиптичности пучка вдоль оси z (cm) в  $E_+$  (сплошная линия) и  $E_-$ (пунктирная линия) компонентах поля.

Рис.15. Кривая, описывающая процесс конверсии знака вихря для случая  $w_x = 2w_y = 10 \, \mu m$ ,  $n_x = 1.5, n_y = 1.7$ , a = 0.6

Такие циклические изменения момента главным образом связаны с расходимостью пучка и периодическим изменением состояния поляризации только в его центральной части. Особое внимание следует уделить генерации цепочек вихрей и перестройке их в единичный вихрь при почти перпендикулярном распределении пучка к оптической оси кристалла.

При наклонном распространении пучка существенно меняется вид коноскопической картины (Рис.16).



Рис. 16. Компьютерная модель изменений светового поля после кристалла SiO<sub>2</sub>. Картины интенсивности и фазы построены для различных  $\alpha_0$  и постоянном угле  $\psi = 20^{\circ}$  в плоскости z = 20 сm. Перетяжки пучков при этом составляли:  $\omega_{ox} = 30 \mu m$  и  $\omega_{oy} = 36 \mu m$ .

Вид изменения эллиптичности поля после кристалла при наклоне пучка имеет неоднородный характер, с выраженными С-точками (точками с циркулярной поляризацией). После четвертьволновой пластинки С-точки превращаются в оптические вихри. За счет изменения наклона пучка, его перетяжки эллиптического поперечного сечения и положения оптической оси кристалла, можно цепочку оптических вихрей превратить только в один осевой вихрь (рис. 17).



Рис. 17. Эволюция цепочки оптических вихрей при различных углах наклона падающего гауссова пучка. Поле (а) соответствует  $\alpha_0 = 3^\circ$  для компоненты левой циркулярной поляризации  $E_-$  и поле (b) для  $\alpha_0 = 7^\circ$ . Рисунок (c) описывает распределение поляризации в окрестности минимума. Перетяжки пучков:  $\omega_{ax} = 50 \,\mu m$  и  $\omega_{ax} = 60 \,\mu m$ .

Результаты эксперимента с высокой точностью согласуются с компьютерной моделью. На рис. 18 представлено распределение интенсивности в левой циркулярной компоненте поля с единичным вихрем, находящемся в центре пучка. Распределение поляризации указывает на наличие поляризационных сингулярностей типа «лимон» и «звезда».



Рис.18. Распределение интенсивности, поляризация и интерференция с опорным гауссовым пучком компоненты Е. для угла наклона  $\alpha = 17^{\circ}$  и соответствующих перетяжек  $\omega_{\alpha x} = 90 \ \mu m, \ \omega_{\alpha y} = 108 \ \mu m$ 

Важной особенностью процесса эволюции оптических вихрей при полном обороте кристалла является смена знака топологического заряда  $\xi = \pm 1$ , которая может быть контролируемая углом поворота  $\psi = 0 \div 360^{\circ}$ . В узком диапазоне углов топологический заряд вихря переключается между значениями +1 и - 1. Данный эффект может быть объяснен с точки зрения симметрии скрытой коноскопической круговом вращении меняются знаки фаз картины. При ee В четвертях коноскопической картины что приводит к конверсии знака оптического вихря при малом вращении оптической оси кристалла.

В пятой главе рассмотрено практическое применение оптических вихрей в вихревом сканирующем оптическом микроскопе, что позволяет исследовать, например, геометрию поверхности исследуемого образца с помощью оптических вихрей посредством анализа искажения фазовой сингулярности. Показана процедура анализа фазы вихря, несущего информацию и топологии образца, выявлены зависимости и экспериментально подтверждены теоретические расчеты зависимости динамики искажения фазы вихря от характера падающего излучения в системах с различной апертурой. Показано, что ответ оптического вихря, переносимого сфокусированным гауссовым пучком на малый сдвиг фазовой пластинки, генерирующей фазовую сингулярность, имеет интересную особенность, которая может быть использована для микроскопии высокого разрешения. Согласно аналитическим формулам, представленным в работах [5\*, 9] сдвиг оптического вихря может быть описан следующим образом:

$$x_{o} = x_{c} \left( 1 - z_{o} g(z) \right), \ y_{o} = \frac{2 z_{o}}{k w^{2}(z)} x_{c}, \ g(z) = \frac{1}{R(z)} + \frac{1}{f}$$
(20)

где:  $x_o$ ,  $y_o$  – координаты положения центра минимума интенсивности в плоскости наблюдения,  $x_c$  –координата сдвига фазовой пластинки, f-фокусное расстояние собирающей линзы, w(z) –перетяжка гауссова пучка, R(x) –радиус кривизны волнового фронта,  $z_o$  – расстояние между фазовой пластинкой и плоскостью наблюдения. Выражения (20) описывают поведение вихря в пучке, повторяющего сдвиг фазовой пластинки вдоль прямой линии. Однако, форма данного движения отличается и линия траектории движения наклоняется на различные углы  $\alpha$ , в зависимости от положения  $z_o$  плоскости отображения. В таком случае угол  $\alpha$  определяется выражением:

$$\alpha = \arctan\frac{x_o}{y_o} = \arctan\left(\frac{2}{k}w^2\left(z\right)\left(\frac{1}{z_o} - \frac{1}{R(z)} + \frac{1}{f}\right)\right)$$
(21)

Для экспериментального доказательства полученных результатов была собрана и отъюстирована экспериментальная установка (рис. 19).



Рис. 19. Схема экспериментальной установки. Ls-He-Ne лазер, L<sub>1,2,3,4</sub> –линзы, Bs<sub>1,2</sub> –делительный куб, VL–фазовый транспарант, D–диафрагма, Mr<sub>1,2</sub>-зеркала,SH–исследуемый образец, F– фильтр, CCD – камера фиксации изображения

Рис. 20. Экспериментальные фазовые портреты для случаев a) d=1mm, b) d=2mm, c) d=3mm, d) d=4mm. Фокусное расстояние линзы f=50mm

Таким образом, выражения, представленные выше, согласуются с данными эксперимента (рис. 20). Красные прямые указывают на наклон траектории вихря в зависимости от смещения плоскости наблюдения. Выявлено, что степень наклона при равных сдвигах зависит от ширины пучка таким образом, что 4<sup>x</sup> изменение перетяжки пучка усиливает отклонение траектории вихря  $\alpha'$  в двенадцать раз при тех же смещениях d. Приведенные выше факты позволяют сформировать принципы построения прототипов оптического вихревого сканирующего микроскопа. Сканирование образца происходит посредством движения фазовой сингулярности в сечении пучка. Геометрия поверхности может быть проанализирована благодаря высокой чувствительности фазы оптического вихря к малым искажениям волнового фронта. Интерференция опорного гауссова пучка и пучка, прошедшего изотропную тонкую пластинку с нанесенным клинообразным слоем толщиной  $d = 0 \div 500 \ nm$ дает возможность отъюстировать поворот фазовой спирали в зависимости от толщины нанесенного слоя, а так же исследовать поведение оптического вихря в данной системе (рис. 21).



5,5  $\mu m$ Рис. 21. Динамика фазы вихря при сдвиге изотропной пластинки. Наложения фазовых картин для: a) d = 0,1mm, б) d = 0,2mm, в) d = 0,3mm, г) d = 0,5mm, д) d = 0,7mm

Оценка чувствительности фазы показывает, что различимый поворот фазовой спирали происходит при величине разности толщин изотропной пластинки  $\lambda / 40$ .

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Получены решения векторного параксиального волнового уравнения для пучков, распространяющихся перпендикулярно оптической оси одноосного кристалла, а так же под углом к перпендикуляру к оптической оси.

2. Впервые исследовано поведение смещенного относительно оси пучка оптического вихря. Показано, что эволюции оптического вихря можно разделить на два случая: в первом случае положение смещенного оптического вихря строго задано ( $\varphi = const$ ), в то время как кристаллографические оси кристалла подвижны ( $\psi \neq const$ ); во втором случае главные кристаллографические оси зафиксированы ( $\psi = const$ ), при этом исходный оптический вихрь в плоскости z = 0 вращается ( $\varphi \neq const$ ). Показано, что в первом случае ( $\varphi = const$ ,  $\psi \neq const$ ) вихрь испытывает вращение по круговой траектории с центром, сдвинутым относительно оси пучка вдоль одной из кристаллографических осей, таким образом, что повороту кристалла на угол  $\psi$  соответствует поворот оптического вихря на угол  $\psi' = 2\psi$ . При этом эллипс интенсивности пучка вращается вместе с кристаллографическими осями. Во втором случае ( $\psi = const$ ,  $\varphi \neq const$ ) вращение вихря в исходном пучке в плоскости z=0

синхронизировано с вращением вихря на выходе кристалла: поворот исходного вихря на угол  $\phi$  соответствует повороту оптического вихря после кристалла на тот же угол  $\phi$  по эллиптической траектории вокруг оси пучка. При этом эллипс интенсивности пучка строго фиксирован.

3. Впервые, теоретически и экспериментально получены и проанализированы траектории вихревых пучков, прошедших систему двух одноосных кристаллов. Показано, что форма траекторий зависит определенным образом от угловых скоростей и от величины ее отношения для обоих кристаллов. Оптическая система, способная таким образом преобразовывать вращение кристаллов в поворот и позиционирование сингулярных пучков, получила название оптический редуктор.

4. Впервые, теоретически и экспериментально установлено, что орбитальный угловой момент сингулярного пучка, прошедшего одноосный кристалл имеет ярко выраженные всплески в сечениях кристалла, изменяющихся в пределах длины волны падающего света. Посредством теплового расширения с достаточно высокой точностью удалось установить характер рождения и аннигиляции поляризационных сингулярностей, а так же конверсию знака топологического заряда вихря.

Было показано, что осцилляции состояний поляризации при распространении пучка сопровождаются перераспределением поляризационных сингулярностей в поперечном сечении пучка таким образом, что это влечет за собой изменение волнового фронта в каждой циркулярно поляризованной компоненте пучка. Движение дислокационных реакций в компонентах пучка отражается на конверсии знака топологического заряда осевого вихря. Расстояние между точками конверсии составляет 0,05 длины волны.

5. На основе теоретической модели и посредством эксперимента показано, что анизотропная одноосная среда способна генерировать единичные оптические вихри и их массив в циркулярно поляризованном гауссовом пучке с эллиптическим поперечным сечением. Модуль топологического заряда генерируемых вихрей не превышает единицы. Установлено, что вращением оптической оси кристалла можно управлять формой и конфигурацией массива в циркулярно поляризованных компонентах сингулярного пучка, а так же знаком топологического заряда оптических вихрей в нем.

6. Впервые предложена модель оптического вихревого сканирующего микроскопа. Экспериментально И теоретически проанализированы траектории И фазы сингулярных пучков после прохождения тонкой клинообразной изотропной пластинки. Показана зависимость наклона вихревой траектории от перетяжки пучка, установлено, что при уширении поперечного сечения в четыре раза, наклон усиливается в двенадцать раз при одинаковом сдвиге плоскости наблюдения. Методом Фурье - анализа интерференционных картин с высокой точностью выявлены особенности поведения фазовых сингулярностей при прохождении изотропной пластинки, экспериментально определен порог разрешения данной системы при сканировании оптическим вихрем поверхности с разностью высот, составившей 40 нанометров.

#### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Soskin M.S. Singular Optics./ M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov // Progress in Optics. [ed by E.Wolf]. – 2001. – V42, Chapter 4. –P219

[2] Фадеева Т.А. Распространение и преобразование сингулярных пучков в анизотропных средах [Текст]: дис. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.05/ Фадеева Татьяна Андреевна; Тавр. нац. ун-т им. В. И. Вернадского. - Симф., 2010. - 333 л.: рис. - Бібліогр.: арк. 316-333.

[3] Nye J.F. Natural focusing and Fine structure of Light: Caustics and Wave Dislocations/ Nye. J.F. – Bristol: Institute of Physics Publishing, 1999. – 328p

[4] Nye J.F. lines of circular polarization in electromagnetic wave fields / J.F. Nye// Proceedings of Royal Society of London A. – 1983. – V. 389. – P. 279-290

[6] Ciattoni A. Propagation of cylindrically symmetric fields in uniaxial crystals / A. Ciattoni, G. Cincotti, C. Palma // J. Opt. Soc. Am. A. – 2002. – V.19, Is.4. – P.792-796.

[7] Воляр А.В. Пучки Лагерра-Гаусса с Комплексным и Действительным Аргументом

в Одноосном Кристалле / А.В. Воляр, Т.А. Фадеева // Оптика и спектроскопия. – 2006. – Т.101, В.3. – С.477-484.

[8] Киселев А.П. Новые структуры параксиальных гауссовых пучков / А.П. Киселев // Оптика и спектроскопия. – 2004. – Т.96, №4. – С.533-535.

[9] Felsen L.B. Evanescent waves / L.B. Felsen // J. Opt.Soc. Am. – 1976. – V.66. – No.8. – P.751-760.

[10] Augustyniak I. New scanning technique for the optical vortex microscope / Augustyniak I., A. Popiołek-Masajada, J. Masajada, S. Drobczyński // Appl. Opt. 51(2012) C117-C124.

#### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

[1\*] Fadeyeva T.A. The precession of vortex-beams in a rotating uniaxial crystal / Fadeyeva T.A., Rubass A.F., **Sokolenko B.V**., Volyar A.V.// J. Opt. A: Pure Appl. Opt. -2009. -Vol 11. Issue: 9. Pages: 53-55

[2\*] **Sokolenko**, **B**., Kudryavtseva, M., Zinovyev, A., et al., "Optical vortex conversion in the elliptic vortex-beam propagating orthogonally to the crystal optical axis: the experiment," Proceedings of SPIE Vol. 8338, 83380D (2011)

[3\*] Fadeyeva T., Non-canonical propagation of high-order elliptic vortex beams in a uniaxially anisotropic medium / Fadeyeva T., Alexeyev C., **Sokolenko B**., Kudryavtseva M. and Volyar A. // Ukrainian Journal of Physical Optics. 12 62-82

[4\*] Соколенко Б.В. Конверсія знака топологічного заряду еліптичного вихору, що пройшов одновісний кристал ортогонально до його оптичної осі / Соколенко Б.В., Рибась О.Ф., Коноваленко В.Л., Зіновьєв О.О. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Фізико-математичні науки. – 2012. – Т. 25(64), № 1. – С. 123-132.

[5\*] Popiolek-Masajada A., Optical Vortex Scanning in an Aperture Limited System / A. Popiolek-Masajada, **B. Sokolenko**, I. Augustyniak, J. Masajada A. Khoroshun, and M. Bacia // Optics and Lasers in Engineering. 55 (2014) pp. 105–112

[6\*] **Sokolenko B.V.**, The vortex generation in revolving uniaxial crystal during the propagating nearly perpendicular to its optical axis / B.V. Sokolenko, A.F. Rubass and A.V.

[7\*] Masajada, J., Popiołek-Masajada, A., Augustyniak, I., **Sokolenko, B**. Towards super resolution imaging with optical vortex scanning microscope (2013) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical, Engineering, Vol.8788

[8\*] **Sokolenko B.V.** The evolution of light spin-orbital momentum within the rotated uniaxial crystal near the perpendicular to its optical axis / B.V. Sokolenko, A.F. Rubass, S. N. Lapaeva, M.V. Glumova and A V. Volyar // Proceedings of SPIE Vol. 9066

#### тезисы конференций

[9\*] Optical reducer of a vortex angular displacement via a system of uniaxial crystals / Yu.A. Egorov, A.F. Rubass, **B.V Sokolenko**, T.A. Fadeyeva, A.V. Volyar // Book of abstracts of Fourth International conference "Singular optics (optical vortices): Fundamentals and applications", Alushta, Ukraine, 15 – 20 September, 2008.

[10\*] Experimental observation of vortex precession in a rotating in an a SiO<sub>2</sub> crystal / A. F., Rubass, **B.V.Sokolenko** // The Ninth International Conference "Correlation Optics 2009", Chernivtsi, Ukraine, 20 – 24 September, 2009.

[11\*] Optical vortex conversion in the elliptic vortex beam propagating orthogonally to the crystal optical axis: the experiment / A.F. Rubass, **B.V Sokolenko**, M.N. Kudryavtseva, A.O. Zinovyev, V.L. Konovalenko, A.V. Volyar // The Tenth International Conference "Correlation Optics 2011", Chernivtsi, Ukraine, 12 – 15 September, 2011.

[12\*] Experimental observation of optical vortex conversion in the elliptic-vortex beam propagating orthogonally to the crystal optical axis / **B.V. Sokolenko**, A.F. Rubass // Scientific Works of Twelfth International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2011, Kyiv, Ukraine, 27-30 October, 2011.

[13\*] Преобразование топологического заряда оптического вихря, прошедшего одноосный кристалл ортогонально к оптической оси / **Б.В. Соколенко**, А.Ф. Рыбась // Материалы XIX Международной молодежной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, Россия, 14 – 17 апреля, 2012.

[14\*] The vortex beam evolution in revolving uniaxial crystal propagating nearly perpendicular to its optical axis / **B.V. Sokolenko**, A.F. Rubass // Scientific Works Proceeding of The Optic and Optical Engineering International Young Scientist Meeting, Sevastopol, Ukraine, 17-20 September, 2012.

[15\*] Can the uniaxial crystal generate the optical vortices in the Gaussian beam propagating perpendicular to its optical axis? / A.F. Rubass, **B.V Sokolenko**, A.V. Volyar // The Eleventh International Conference "Correlation Optics 2013", Chernivtsi, Ukraine, 18 - 21 September, 2009.

[16\*] The evolution of light's spin-orbital momentum within the rotated uniaxial crystal near of perpendicular to its optical axis / **B.V. Sokolenko**, S.N. Lapaeva, A.F. Rubass // The Eleventh International Conference "Correlation Optics 2013", Chernivtsi, Ukraine, 17 - 20 September, 2013.

[17\*] Interference of elliptical beams passed uniaxial crystal near the perpendicular to optical axis: The optical vortex generation / **B.V. Sokolenko**, A.F. Rubass // Scientific Works of Thirteenth International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2013, Kyiv, Ukraine, 24-27 October, 2013.

#### АННОТАЦИЯ

# Соколенко Б.В. Эволюция поляризационных сингулярностей в параксиальных пучках, распространяющихся ортогонально оптической оси одноосного кристалла. – Рукопись

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика, лазерная физика. – Таврический национальный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь, 2014.

Диссертационная работа относится к области сингулярной оптики, в частности к сингулярной кристаллооптике, посвящена исследованию свойств поляризационных и фазовых сингулярностей, особое внимание уделено изучению поведения оптических вихрей в анизотропных средах.

В работе проведены теоретические расчеты, представлены экспериментальные результаты, позволяющие проанализировать природу взаимодействия сингулярных пучков с одноосными кристаллами. Найдены решения параксиального волнового уравнения для случая распространения пучков, переносящих оптический вихрь в анизотропных кристаллах почти перпендикулярно оптической оси. Получен ряд удивительных результатов, среди которых: выявлена конверсия знака заряда осевого вихря, прошедшего одноосный кристалл перпендикулярно оптической оси в процессе теплового расширения; описаны траектории поляризационных сингулярностей, эволюция рождения и аннигиляции топологических диполей, сопровождаемая ярко выраженными всплесками спин-орбитального углового момента.

Исследована способность одноосного кристалла генерировать оптические вихри с единичным топологическим зарядом при распространении исходного гауссова пучка с эллиптическим поперечным сечением под малым углом к перпендикуляру к оптической оси. Изучена возможность создания устройства, позволяющего преобразовывать траектории движения оптических вихрей с помощью поворота кристаллографических осей, результаты экспериментальной и математической модели положены в основу создания оптического редуктора – инструмента, служащего для захвата и угловой ориентации микрочастиц – как расширение возможностей ранее известного «оптического пинцета».

Произведен комплекс экспериментальных исследований характера траектории оптического вихря при смещении фазового транспаранта при различных перетяжках пучка, а так же поведение фазы сингулярности в системе оптического вихревого сканирующего микроскопа. Подтверждена возможность применения уникальных свойств вихрей для вскрытия геометрии поверхности образцов, физические размеры которых меньше длины волны He-Ne лазера. С помощью Фурье-анализа восстановленной фазы вихря установлено разрешение вихревого микроскопа, составляющее 1/20 длины волны падающего излучения.