

## OPTICAL VORTICES

P. V. KOROLENKO

*Fundamental facts about properties of so-called screw dislocations, or vortices in a wave front of laser beams are presented. Physical nature and conditions of their appearance in random medium and in laser resonators are considered.*

**Приводятся основные сведения о свойствах винтовых дислокаций, или оптических вихрей, образующихся на волновом фронте лазерных пучков. Рассмотрены физическая природа и условия формирования оптических вихревых полей в случайно-неоднородных средах и лазерных резонаторах.**

## ОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ

П. В. КОРОЛЕНКО

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

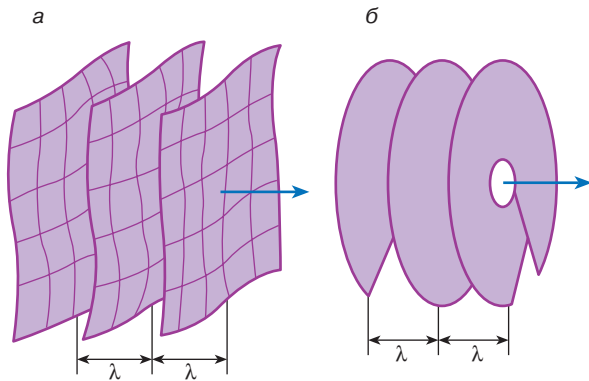
### ВВЕДЕНИЕ

Вихревая пространственно-временная структура многих физических объектов и процессов отражает глубокие фундаментальные свойства материи. Еще великий французский ученый Рене Декарт, трехсотлетие со дня рождения которого отмечалось в 1996 году, считал, что законы вихревого движения во многом определили современный облик материального мира. Эта гениальная догадка Декарта нашла в дальнейшем многочисленные подтверждения. Сейчас установлено, что вихревые, а также близкие к ним по форме винтовые или спиралевидные структурные элементы проявляются как на молекулярном уровне, так и в глобальных процессах, происходящих в атмосфере, океане или космосе. Присущи они и ряду оптических явлений. Так, в последние годы внимание исследователей, работающих в области лазерной физики и когерентной оптики, привлекли световые поля с винтовыми возмущениями волнового фронта. Такого рода возмущения обуславливают вихревой характер распространения световой энергии, что позволяет говорить о существовании оптических вихрей.

В силу важных аспектов фундаментального и прикладного характера изучение оптических вихрей ведется у нас в стране и за рубежом. В настоящее время в оптике сформировалась новая область, называемая оптикой винтовых полей или сингулярной оптикой, в рамках которой рассматриваются свойства оптических вихрей, а также физический механизм их образования.

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ

Как известно, лазерное излучение характеризуется высокой монохроматичностью и направленностью. Это позволяет для описания его свойств использовать понятие эквифазной поверхности (волнового фронта), во всех точках которой световые колебания имеют одинаковую фазу. Если оптические вихри в лазерном пучке отсутствуют, то ему можно поставить в соответствие систему эквифазных поверхностей, близких по форме к плоскостям (рис. 1, а). Расстояние между соседними поверхностями равно длине волны  $\lambda$ . Отклонения эквифазных поверхностей в реальных пучках от плоской формы называются оптическими aberrациями. Aberrации заметны ухудшают свойства лазерных пучков. Их учет и минимизация составляют важную задачу классической теории aberrаций, широко привлекаемую для



**Рис. 1.** Структура волновых фронтов при отсутствии (а) и наличии (б) винтовой дислокации

расчета разнообразных лазерных систем. Однако все aberrации, рассматриваемые в классической теории, деформируют волновой фронт без изменения его топологии.

Иная картина складывается при возникновении в лазерном пучке оптических вихрей. Образование вихрей обусловлено появлением на волновом фронте особых точек, которые имеют сходство с известными в физике твердого тела двумерными дефектами кристаллической решетки – винтовыми дислокациями и имеют то же название. В самой особой точке амплитуда световых колебаний обращается в нуль, а значение фазы не определено, поскольку скорость азимутального изменения фазы обращается в бесконечность. При математическом описании такой особенности принято говорить о наличии сингулярности, что и стало причиной появления упомянутого выше термина “сингулярная оптика”. Основное свойство винтовой дислокации (ВД) состоит в том, что при обходе вокруг нее фаза изменяется на  $2\pi$ . На поверхности волнового фронта может возникать как единичная ВД, так и система дислокаций. В зависимости от направления закрутки волнового фронта все ВД подразделяются на левые и правые. Появление ВД кардинальным образом меняет топологию волнового фронта. Эквивалентная поверхность перестает быть многолистной (см. рис. 1, а), и осуществляется переход к единой поверхности волнового фронта со специфической винтовой структурой. Это иллюстрирует рис. 1, б, на котором изображен волновой фронт лазерного пучка с ВД, расположенной на оси. Так как направление распространения световой энергии задается вектором, перпендикулярным в каждой точке поверхности волнового фронта, то в окрестности ВД будет происходить завихрение энергетического потока.

В окрестности ВД амплитуду световых колебаний  $u$  можно с хорошим приближением представить в виде [1]

$$u = Cr \exp(\pm i l \alpha), \quad (1)$$

где  $C$  – произвольная константа,  $r$  – расстояние от ВД,  $\alpha$  – азимутальный угол. Выражение (1) представляет собой традиционную для когерентной оптики форму записи комплексной амплитуды. Согласно этой форме, функция, характеризующая распределение фазы в плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучка, входит в мнимый показатель экспоненты. То, что в данном случае эта функция представлена в виде одного множителя  $\alpha$ , свидетельствует о равномерном по азимуту изменении фазы.

Приведенные выше характеристики относятся к дислокациям первого порядка, азимутальное изменение фазы в окрестности которых составляет  $2\pi$ . Однако физически представляется возможным формирование ВД более высокого порядка. Скорость азимутального вращения фазы у них выше, и изменение фазы за полный обход по азимуту равно  $2\pi l$ , где целое число  $l$  определяет порядок дислокации. Для описания регулярных ВД высоких порядков используется выражение

$$u = Cr^l \exp(\pm i l \alpha). \quad (2)$$

### МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ВД

Образование ВД на волновом фронте лазерных пучков является чисто фазовым эффектом. Поэтому единственным способом, обеспечивающим надежную идентификацию ВД, является способ, основанный на использовании интерферометрической информации. Интерферограммы поперечного сечения пучка могут быть получены разными способами. Самым удобным является способ, основанный на регистрации структуры интерференции исследуемого поля с плоской или сферической однородными волнами (естественно, исследуемая и опорная волны должны быть взаимно когерентными).

Рассмотрим интерференционные портреты ВД первого и второго порядков. Если в качестве опорной волны взять соосную сферическую волну с амплитудой  $a$  и радиусом кривизны волнового фронта  $R$ , то суммарная комплексная амплитуда поля  $u_\Sigma$  в области интерференции будет иметь вид

$$u_\Sigma = Cr^l \exp(i l \alpha) + a \exp\left(i \frac{\pi r^2}{\lambda R} + i \beta\right), \quad (3)$$

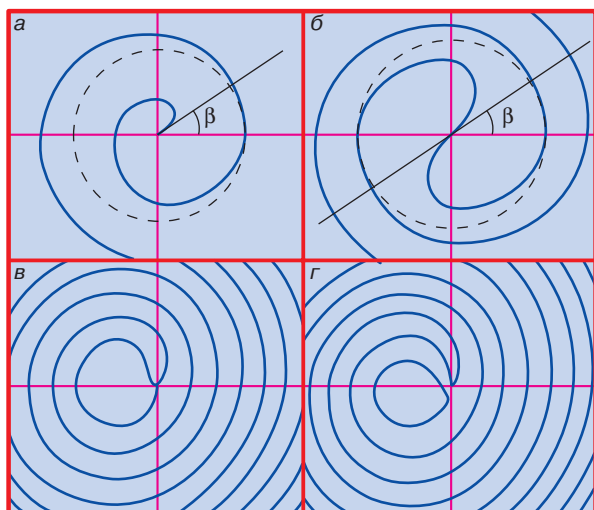
где  $\beta$  – расстройка по фазе между интерферирующими волнами. Присутствующий в показателе второй экспоненты фактор  $\pi r^2 / (\lambda R)$  определяет фазовый сдвиг между сферической и плоской волнами.

Переходя к безразмерной величине радиуса-вектора  $r' = \sqrt{\pi r^2 / (\lambda R)}$  и приравнявая к нулю действительную и мнимую части формулы (3) легко установить, что темные линии на регистрируемой интерференционной картине будут удовлетворять условию

$$r' = \sqrt{l \alpha - \beta}. \quad (4)$$

На рис. 2, *а, б* показана структура темных линий на интерферограмме для ВД первого и второго порядков. Здесь же пунктиром изображено первое темное кольцо интерференционной картины, получающейся в том случае, если со сферической волной вместо волны с дислокацией интерферирует плоская волна. На рисунках видно, что в области ВД формируются спиральные интерференционные полосы. Волновой дислокации первого порядка соответствует одинарная спираль, а дислокации второго порядка – двойная. Параметр  $\beta$  не влияет на общую структуру интерферограмм. Его изменение приводит лишь к повороту спиралей вокруг оси. Если ВД смещена относительно оси опорной сферической волны, то структура интерферограмм меняется (см. рис. 2, *в, г*). Волновая дислокация первого порядка порождает на интерферограмме одну дополнительную полосу, а ВД второго порядка – две полосы.

Рассмотрим теперь физический механизм формирования вихревых лазерных полей. В настоящее время установлено, что излучение с вихревой структурой может при определенных условиях формироваться в результате интерференции лазерных пучков с исходно регулярным волновым фронтом, при их прохождении через случайно-неоднородные и нелинейные среды, а также через волоконные световоды или специальным образом изготовленные голограммы. Кроме того, возможно возбуждение вихревых полей непосредственно в лазерах. В статье мы ограничимся более подробным рассмотрением механизма образования оптических вихрей в случайно-неоднородных средах и лазерных резонаторах.



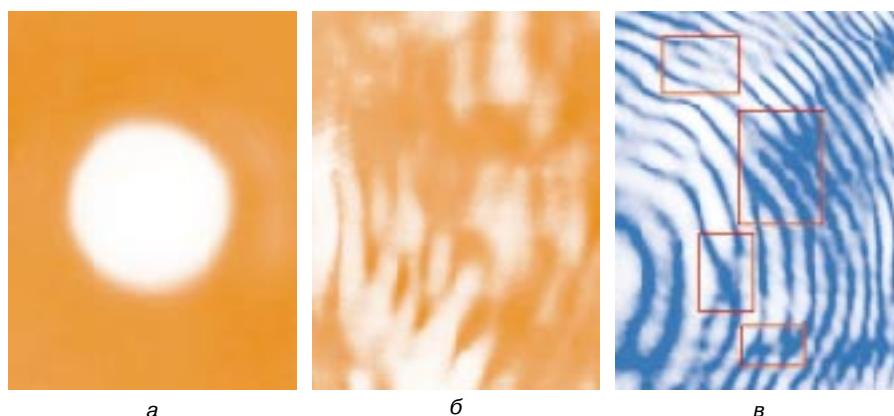
**Рис. 2.** Интерференционные портреты винтовых дислокаций первого (*а, в*) и второго (*б, г*) порядков; опорная волна соосна (*а, б*) и смещена (*в, г*)

## ОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ В СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Наиболее часто волновые дислокации волнового фронта лазерных пучков, обуславливающие вихревую структуру светового поля, наблюдаются при распространении излучения через оптические элементы и передающие среды со случайными неоднородностями показателя преломления. Так, волновые дислокации могут быть зарегистрированы на волновом фронте в результате прохождения достаточно больших расстояний в атмосфере [2]. В последнем случае возникновение оптических неоднородностей связано с развитием турбулентных образований в приземном слое атмосферы, происходящим из-за наличия температурных градиентов и конвективных потоков.

Под влиянием флуктуаций показателя преломления вдоль трассы в световой волне возникают изменения фазы, связанные с ускорением или замедлением скорости распространения различных участков волнового фронта. Возмущения эквивалентной поверхности вызывают отклонение локальных нормалей к волновому фронту от первоначального направления распространения волны. Если изгибы эквивалентной поверхности значительны, то нормали пересекаются, вызывая интерференцию различных участков волнового фронта в плоскости наблюдения. Интерференция, в свою очередь, приводит к глубокой хаотической модуляции распределения амплитуды и фазы, в результате которой распределение интенсивности приобретает вид многочисленных, хаотически расположенных и имеющих неправильную форму световых пятен – спеклов. При этом будут возникать предпосылки для возникновения на границах между спеклами точек с нулевым значением амплитуды, вокруг которых будет происходить завихрение светового поля.

Эксперименты полностью подтверждают правильность таких представлений. На рис. 3, *а, б* приведены фотографии лазерного пучка до и после прохождения атмосферной трассы длиной 600 м в условиях развитой мелкомасштабной турбулентности. Исходная структура пучка (рис. 3, *а*) характеризуется высокой однородностью распределения интенсивности. После прохождения трассы структура пучка (рис. 3, *б*) претерпевает качественные изменения. Распределение интенсивности приобретает спеклоподобный вид. При этом на границах спеклов формируются ВД. На рис. 3, *в* приведена интерферограмма фрагмента поперечной структуры. Наличие на ней многочисленных разветвлений интерференционных полос свидетельствует о присутствии большого числа ВД (для удобства наблюдения часть их помечена на рисунке прямоугольниками). Появление или исчезновение в области каждого разветвления лишь одной полосы показывает, что все ВД имеют порядок  $l = 1$ , причем в пучке присутствуют равные количества левых и правых ВД.



**Рис. 3.** Фотографии (а, б) и интерферограмма лазерного пучка (в): а – исходный пучок, б, в – пучок после прохождения атмосферной трассы

То, что все регистрируемые ВД имеют первый порядок, объясняется неустойчивостью ВД более высокого порядка даже к малым случайным возмущениям поля. Незначительное шевеление волнового фронта вызывает распад ВД высокого порядка на соответствующее число ВД с  $l = 1$ .

Количество ВД напрямую связано с интенсивностью турбулентных процессов в атмосфере, которую можно регистрировать по уровню локальных флуктуаций показателя преломления. Эта связь проявляется настолько отчетливо, что были предложены и нашли практическую реализацию методы диагностики турбулентных состояний атмосферы на основе регистрации и подсчета числа ВД.

Указанные методы могут служить положительным примером использования уникальных свойств вихревых полей. Однако часто приходится сталкиваться и с негативными эффектами, вызванными появлением оптических вихрей. Так, присутствие ВД на волновом фронте излучения серьезным образом усложняет работу специальных адаптивных устройств, используемых в лазерных системах для компенсации фазовых искажений. В тех случаях, когда в таких устройствах компенсация возмущений фазы осуществляется при помощи гибкого отражающего зеркала, ликвидация ВД на волновом фронте оказывается в силу их топологических особенностей принципиально невозможной.

Для рассмотренных выше процессов формирования вихрей в световых пучках с исходно плоским фронтом очень важно наличие в каналах распространения неоднородностей, изменяющих скорость световой волны. В определенном смысле ситуация аналогична развитию турбулентности в потоках жидкости или газа, когда присутствие препятствий приводит к локальным изменениям скорости и переходу от ламинарного к турбулентному движению. В оптике безвихревые пучки с непересекающимися лучами могут быть соотнесены с ламинарными по-

токами жидкости или газа, а пучки с оптическими вихрями – с турбулентными потоками. Однако оптические вихри могут образовываться и непосредственно в источниках когерентного излучения – лазерах. Здесь механизм их формирования имеет принципиальные отличия, хотя дефекты и неоднородности в оптических элементах лазера играют не последнюю роль. Рассмотрим это более подробно.

**ГЕНЕРАЦИЯ ВИНТОВЫХ ПОЛЕЙ В ЛАЗЕРАХ**

Как известно, лазер состоит из оптического резонатора, образованного двумя параллельными плоскими или сферическими зеркалами, и расположенной внутри него усиливающей среды. Одно из зеркал резонатора обычно является полностью отражающим, другое – полупрозрачным, что позволяет часть генерируемой внутри резонатора световой энергии выводить из него в виде узконаправленного светового пучка. Наиболее добротными, а потому наиболее часто используемыми являются резонаторы с вогнутыми зеркалами, обеспечивающими устойчивую подфокусировку отражающегося от них излучения. Для таких резонаторов можно найти решение волнового уравнения в виде самовоспроизводящихся при последовательном отражении от зеркал внутрирезонаторных световых структур, называемых модами.

В общем виде поля этих мод характеризуются в поперечном сечении следующим распределением комплексной амплитуды [3]:

$$u_{pl} \sim f_{pl}\left(\frac{r}{w}\right)(a_{pl}e^{iia} + b_{pl}e^{-iia}), \tag{5}$$

где  $w$  – параметр ширины распределения,  $f_{pl}(t) \sim t^l L_p^l(2t^2)e^{-t^2}$ ,  $L_p^l$  – обобщенные полиномы Лагерра, представляющие собой осциллирующие функции, индекс  $p$  определяет число их пересечений с осью  $t$ ;  $a_{pl}$  и  $b_{pl}$  – произвольные постоянные; индекс  $l$ , как и



прежде, характеризует азимутальные изменения фазы. Вид показателей у экспоненциальных множителей указывает на возможность возбуждения в резонаторе лазера винтовых полей. Однако реализовать эту возможность на практике бывает непросто. Первое препятствие состоит в том, что обычно в резонаторе отсутствует предпочтительное направление закрутки оптического вихря, в результате чего осуществляется равенство коэффициентов  $a_{pl}$  и  $b_{pl}$  и формула (5) принимает вид

$$u_{pl} \sim f_{pl} \left(\frac{r}{w}\right) a_{pl} \begin{cases} \cos l\alpha, \\ \sin l\alpha. \end{cases} \quad (6)$$

Распределение (6) характеризуется знакопеременной амплитудой с многочисленными кольцевыми радиальными узловыми линиями. Исчезновение винтовой структуры поля происходит вследствие наложения и интерференции вихрей разного знака.

Вторая трудность формирования пучков с оптическими вихрями связана с многомодовым характером лазерной генерации. Как правило, в резонаторе лазера возбуждается система мод с разными индексами  $p$  и  $l$ . В общем случае частоты этих мод не совпадают, что снижает когерентные свойства излучения и не позволяет говорить о единой для генерируемого излучения эквивалентной поверхности.

Указанные препятствия для генерации пучков с оптическими вихрями тем не менее можно обойти. Для этого нужно прежде всего обеспечить совпадение частот генерируемых мод. Проще всего это делается путем использования конфокального резонатора, длина которого равна радиусу кривизны зеркал [4]. Конфокальная конфигурация резонатора обеспечивает необходимое совпадение частот мод с разными значениями индексов  $p$  и  $l$ . На рис. 4, *a* представлена фотография излучения лазера с конфокальным резонатором. Видно, что из-за интерференции большого числа мод с одинаковыми частотами и неким разбросом фаз (в общем случайным) формируется спеклоподобное распределение интенсивности. Однако в отличие от хаотической спекл-структуры поля в случайно-неоднородных средах приведенное распределение обнаруживает четко выраженную центральную симметрию. Интерферометрический анализ таких пучков показывает, что на границах между спеклами формируется целая система ВД. Об этом свидетельствует фрагмент интерферограммы пучка, приведенный на рис. 4, *б*. Как и на рис. 3, для удобства идентификации ВД их положение помечено прямоугольниками.

Остановимся, наконец, на возможности генерации в лазерах регулярных винтовых полей. Эксперименты показали [4], что такие поля несложно получать во многих типах лазеров при несlišком высоком превышении порога самовозбуждения. Вначале на отражающее покрытие одного из зеркал на оси резонатора наносят в виде маленького пятнышка покрытие из поглощающего материала. Это

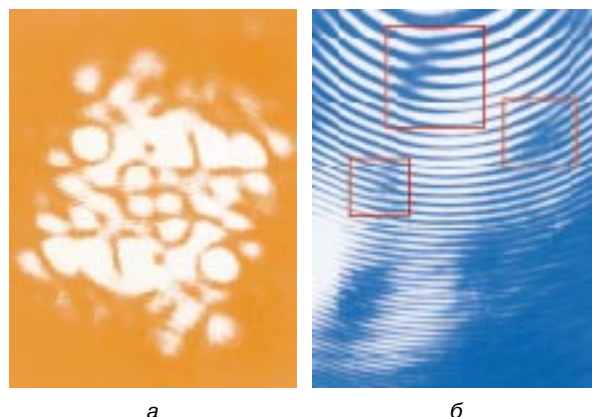
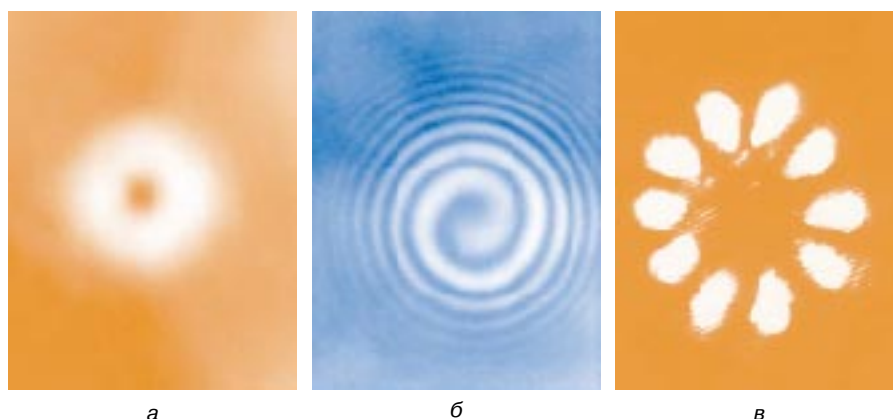


Рис. 4. Структура (а) и интерферограмма (б) излучения лазера с конфокальным резонатором

позволяет подавить возбуждение мод с максимальным значением интенсивности на оси, обладающих, как правило, наибольшим усилением. Затем уменьшают размеры внутрирезонаторной диафрагмы до тех пор, пока излучение лазера на выходе не примет кольцевую форму (рис. 5, *a*). Это и есть пучок с винтовой структурой волнового фронта. Его интерферограмма приведена на рис. 5, *б*. Ее сравнение с расчетной интерференционной структурой на рис. 1, *a* позволяет утверждать, что в центре сфотографированного пучка находится ВД первого порядка. Варьируя размеры поглощающей зоны на поверхности зеркала и внутрирезонаторной диафрагмы, в принципе можно получать регулярные поля кольцевой формы, соответствующие ВД более высоких порядков. То, что лазер генерирует одну из двух возможных винтовых мод, различающихся направлением закрутки, объясняется неравенством их потерь. Вблизи порога самовозбуждения из-за всегда присутствующих слабых паразитных отражений от элементов лазера добротность одной из двух возможных винтовых мод может случайным образом оказаться выше. При увеличении накачки лазера и значительном превышении порога самовозбуждения условия генерации мод с противоположной закруткой фронта нивелируются. Интерферируя между собой, моды будут формировать поле, описываемое формулой (6) с нулевым значением индекса  $p$ . Такое поле характеризуется системой располагающихся по диаметру пучка узловых линий, количество которых равно  $l$ . В качестве иллюстрации на рис. 5, *в* приведено поле данного типа с  $l=5$ .

Существуют ли способы генерации в лазерах регулярных винтовых полей, обладающих высокой интенсивностью, вдали от порога самовозбуждения? Такие способы разработаны. Они успешно реализованы в кольцевых лазерах и лазерах на многоходовых модах. Однако сколько-нибудь подробное описание этих способов выходит за рамки статьи. Укажем лишь, что мощные вихревые пучки с коль-



**Рис. 5.** Структура поля регулярной винтовой моды (а, б) и суперпозиции винтовых мод (в); а – распределение интенсивности, б – интерферограмма

цевой формой широко используются в лазерной технологии обработки материалов, так как создают более равномерное распределение температуры. Кроме того, при импульсной генерации вихревого пучка появляется возможность пропускать его через воздушную среду в волноводном режиме, исключая дифракционное расплывание. Из-за обращения интенсивности в центре пучка в нуль температура воздуха на оси пучка оказывается ниже (а показатель преломления выше), чем в остальных областях его сечения. Тем самым создаются условия для постоянной подфокусировки пучка в процессе его распространения. Столь уникальные свойства делают весьма эффективным использование вихревых лазерных пучков в системах оптической связи, а также в разнообразных метрологических устройствах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели лишь часть вопросов, относящихся к процессам формирования оптических вихрей в световых пучках. Но и они позволяют сделать вывод о большом объеме теоретического и экспериментального материала, накопленного в последние годы в ходе исследования фазовых сингулярностей. Полученные результаты не только расширяют фундаментальные представления о свойствах оптических полей со сложным амплитудно-фазовым распределением, но и открывают новые возможности их практического использования.

Отметим, что изучение винтовой дислокационной формы волновых фронтов приобрело в последнее время актуальность не только в области оптических исследований, но и в других разделах физики, в которых большую роль играют волновые процессы. Это прежде всего относится к радиофизике и акустике. Есть сообщения о регистрации ВД в ионосферных радиосигналах, а также в акустических сигналах, распространяющихся в океанических

волноводах. Исследование ВД стимулировало развитие новых научных направлений. Среди них в качестве наиболее яркого примера можно выделить развитие дислокационной томографии океана. Она позволяет определять гидродинамические возмущения различных типов путем регистрации вихрей в акустической волне, распространяющейся в океане. Не исключено, что методами дислокационной томографии удастся обнаруживать зарождение даже мезомасштабных неоднородностей типа синоптических турбулентных образований. Таким образом, концепция фазовых сингулярностей и связанных с ними вихревых структурных элементов оказалась весьма плодотворной при анализе сложных волновых процессов разной физической природы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985. 248 с.
2. Арсеньян Т.И., Кауль С.И., Короленко П.В. и др. Дислокации волнового фронта в турбулентной среде // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37, № 10. С. 1773–1777.
3. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М.: Наука, 1979. 328 с.
4. Гринь Л.Е., Короленко П.В., Федотов Н.Н. О генерации лазерных пучков с винтовой структурой волнового фронта // Оптика и спектроскопия. 1992. Т. 73, № 5. С. 1007–1010.

\* \* \*

Павел Васильевич Короленко, доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики и спектроскопии физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, зав. лабораторией когерентной оптики. Область научных интересов: физика лазеров, оптика когерентного излучения. Автор и соавтор свыше 100 научных работ и трех учебных пособий.