

УДК 535.8

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МУЛЬТИПЛЕКСНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

© 2024 г. А. М. Зотов¹, П. В. Короленко¹*, Н. Н. Павлов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова”, Москва, Россия

*E-mail: pykorolenko@rambler.ru

Поступила в редакцию 29.08.2023 г.

После доработки 15.09.2023 г.

Принята к публикации 29.09.2023 г.

Применительно к разнообразным прикладным задачам рассмотрена группа вопросов об оптимизации характеристик вихревых световых пучков, использующихся в мультиплексных оптических системах. Предложен новый способ формирования систем сингулярных пучков с мелкомасштабными дислокационными образованиями, которые обеспечивают высокую степень устойчивости их структуры к влиянию дифракционных эффектов.

DOI: 10.31857/S0367676524010048, EDN: SBDXNB

ВВЕДЕНИЕ

Очень часто при проведении экспериментов и разработке оптических устройств востребованными являются световые пучки с дислокационной структурой волнового фронта [1, 2]. Даже обычные спекловые поля, образующиеся при прохождении света через случайно неоднородные пластины или среды, обладают системой фазовых сингулярностей в виде винтовых дислокаций [3]. По их количеству можно судить о величине присутствующих в оптическом тракте неоднородностей. Лазерные пучки с регулярной системой дислокаций благодаря своим свойствам могут с высокой степенью эффективности использоваться в оптических системах связи [4]. При анализе фазовых изображений наличие в них фазовых сингулярностей позволяет преодолеть дифракционные ограничения по разрешению [5]. Мультиплексные системы, включающие набор волновых пучков с единичными дислокациями на волновом фронте, нашли применение в оптических пинцетах, позволяющих захватывать и перемещать малые частицы [6, 7]. При оптимизации работы указанных систем и устройств часто необходимым является требование, чтобы при дифракционном распространении излучения в их оптических каналах общий вид распределения амплитуды и фазы в поперечном сечении не претерпевал существенных изменений. Цель данной работы состоит в решении этой задачи на основе нового подхода к созданию мультиплексной оптической системы с предельно малыми дислокационными образованиями и высокой структурной устойчивостью.

РЕГУЛЯРНАЯ МУЛЬТИПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА С МЕЛКОМАСШТАБНЫМИ ДИСЛОКАЦИЯМИ

Мультиплексная система строилась из набора ячеек, в центре которых располагался парциальный пучок с винтовой дислокацией волнового фронта. На рис. 1 приведен фрагмент из четырех соседних ячеек. Для того чтобы на границах ячеек приравнять значения фазы пучков, направление поперечных координат x , y в соседних ячейках изменялось (см. рис. 1).

Предельно малая по ширине винтовая дислокация моделировалась путем азимутального вращения линейной дислокации, обладающей одной сингулярной линией. Амплитуду поля в области линейной дислокации с максимально возможным градиентом фазы можно представить в виде выражения:

$$E(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^P \frac{\sin\left((2k+1)\frac{\pi x}{d}\right)}{2k+1}, \quad (1)$$

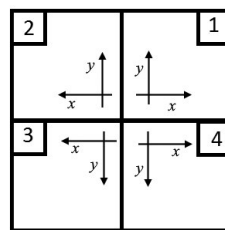


Рис. 1. Фрагмент мультиплексной системы.

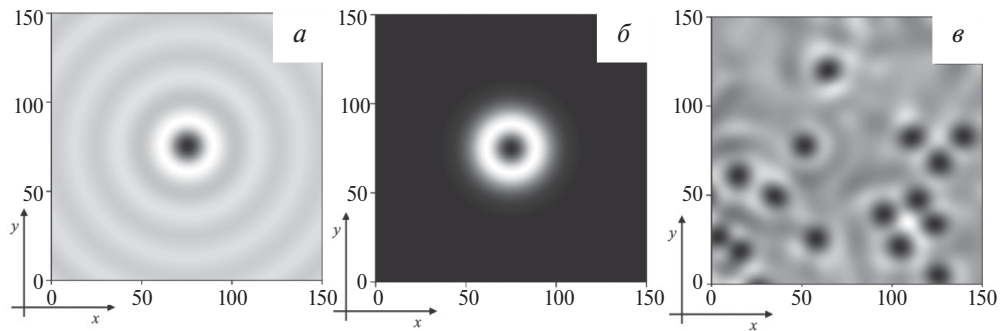


Рис. 2. Образующие пучки мультиплексных систем: пучок на основе краевой дислокации (а), цилиндрическая мода TEM_{01} (б), случайно расположенные дислокации (в).

где P — число синусоидальных гармоник. Считалось, что координатная ось x перпендикулярна сингулярной линии и содержит N значащих точек; $d = N/2$.

Процедура вращения обеспечивала примерно постоянный уровень интенсивности в окрестности сингулярной точки. Ширина w дислокационного образования определялась как ширина распределения интенсивности на полувысоте от точки сингулярности. Используемый для построения винтовой дислокации алгоритм [6] позволял выразить w посредством формулы:

$$w = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{d}{(P+1)}. \quad (2)$$

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МУЛЬТИПЛЕКСНЫХ СИСТЕМ С РАЗЛИЧНЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ ПУЧКАМИ

Изображение парциального пучка мультиплексной системы, полученного путем вращения линейной дислокации (мультиплекс I), показано на рис. 2а. Характеристики мультиплекса I были сопоставлены с характеристиками мультиплексов, построенных с применением пучков с иной дислокационной структурой. С этой целью для мультиплекса II были использованы цилиндрические моды Лагерра-Гаусса TEM_{01} (рис. 2б), а для мультиплекса III — спеклоподобные пучки с системой винтовых дислокаций (рис. 2в).

Для уменьшения эффективной площади дислокаций спеклоподобная структура предварительно подвергалась процедуре сжатия. Сжатие осуществлялось путем применения итерационного алгоритма Герцберга-Секстона, применяющегося при решении фазовой проблемы в оптике [8]. Он позволял в 4–5 раз уменьшать размеры дислокаций. Структуры, предназначенные для сравнения, строились таким образом, чтобы изначальные

эффективные размеры дислокаций были такими же, как и у претерпевшей вращение краевой дислокации.

Был подробно изучен процесс распространения в свободном пространстве световых структур, соответствующих мультиплексам I–III. Для определения изменений в их амплитудно-фазовом распределении использовался метод разложения начального поля по плоским волнам. Амплитуды плоских волн определялись с помощью двумерного быстрого преобразования Фурье. В ходе сравнения динамических характеристик различных мультиплексов особое внимание уделялось неизменности положения центров дислокационных образований и сохранению формы амплитудно-фазового распределения. Расчеты показали, что наибольшей структурной устойчивостью к влиянию дифракции в процессе распространения обладает мультиплекс I. До расстояния от начальной плоскости $z = 0.015 T$ (T — длина самовоспроизведения начальной периодической структуры) он сохранял общую форму амплитудно-фазового распределения при неизменном положении центров дислокационных образований. Мультиплексы с другими типами дислокаций на таком же удалении от начальной плоскости кардинальным образом меняли свою форму. Это происходило вследствие перекрытия и последующей интерференции парциальных пучков, происходящих на более близких расстояниях от начальной плоскости. Эти эффекты вызывали значительные искажения светового поля. Наиболее сильно искажалось поле мультиплекса III. Уже начиная с расстояния $z = 0.002 T$ присущие ему случайно расположенные дислокации начинали хаотически смещаться, исчезая на отдельных участках и возникая вновь.

Рис. 3 дает более наглядное представление об особенностях распространения рассматриваемых мультиплексов. На представленных рисунках значащая точка по горизонтальной оси z , равная $z = 400$, соответствует величине $z = 0.015 T$. Величины по вертикальной оси отложены в условных

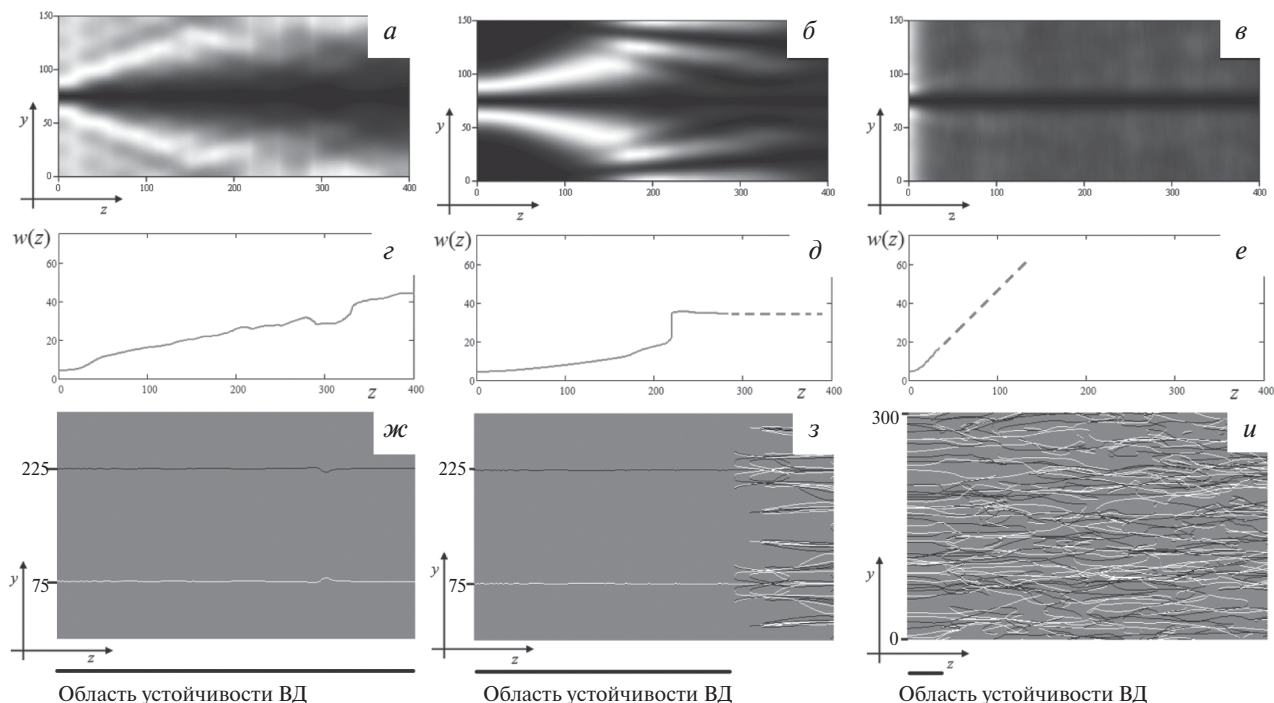


Рис. 3. Характеристики мультиплексов I–III: характеристики мультиплекса I (а, г, ж); характеристики мультиплекса II (б, д, з); характеристики мультиплекса III (в, е, и); продольные распределения интенсивности в грациях серого (а, б, в); изменения размеров дислокаций w (г, д, е); траектории перемещения дислокационных образований (ж, з, и); y, z — поперечная и продольная координаты.

единицах. На рис. 3а — 3б показано, как вдоль продольной координаты z меняется распределение интенсивности в окрестности соответствующих дислокаций. Видно, что мультиплекс I на начальном этапе распространения характеризуется более умеренными выбросами интенсивности по сравнению с мультиплексом II. Распределение интенсивности на рис. 3в обладает общими слабыми изменениями интенсивности вследствие случайных смещений многочисленных дислокаций. На рис. 3г — 3д показано изменение размеров дислокационных образований в мультиплексах I и II по мере их распространения в пространстве. Видно, что у мультиплекса I приращение размеров происходит более плавно, в то время как у мультиплекса II вблизи критического расстояния $z = 0.015 T$ средний размер дислокаций резко увеличивается. Корректно проследить, как меняются эффективные размеры дислокаций у мультиплекса III, можно лишь в непосредственной близости от начальной плоскости, при удалении от нее оценить изменение размеров не представляется возможным из-за малой «длины пробега» дислокаций в спеклоподобных структурах. Участки графиков, помеченные пунктиром, соответствуют распаду дислокаций. Рис. 3ж — 3и иллюстрируют геометрию траекторий дислокаций в процессе их распространения. Темные и светлые линии траекторий относятся к дислокациям

с противоположным по знаку топологическим зарядом. Если судить по длине прямых отрезков траекторий, то наибольшей устойчивостью обладает форма траекторий мультиплекса I. Несколько хуже обстоит дело с устойчивостью дислокаций мультиплекса II. Их траектории начинают заметно усложняться на расстояниях, на которых дислокационная структура мультиплекса I не претерпевает еще заметных возмущений. Траектории изначально случайно расположенных дислокаций мультиплекса III сохраняют свою направленность лишь вблизи начальной плоскости. Дальнейшее кардинальное усложнение траекторий объясняется тем, что в процессе распространения мультиплекса винтовые дислокации могут исчезать и появляться вновь. При этом длина траекторий без существенных смещений дислокаций крайне незначительна. Для удобства сравнения структурных изменений в мультиплексах разных типов внизу соответствующих рисунков в направлении оси z проведена черная линия, длина которой определяет область устойчивости характеристик мультиплекса.

С целью получения дополнительной информации об особенностях распространения мультиплексов была проведена для каждого из них оценка изменения ширины гистограммы распределения интенсивности. Она показала, что гистограммы мультиплексов I и II в процессе их

распространения в области устойчивости уширялись более чем на порядок. Иной характер носила трансформация гистограммы у мультиплекса III. Ее ширина резко возрастала (в три раза) на небольших расстояниях от начальной плоскости, а затем оказывалась практически неизменной.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Выполненный анализ свойств мелкомасштабной мультиплексной системы с винтовыми дислокациями, построенными путем вращения дислокаций линейного типа, показал высокую степень ее устойчивости к влиянию дифракционных эффектов. Эту устойчивость следует объяснить близким к постоянному уровню значением интенсивности в окрестности малоразмерных дислокационных образований. Это доказывает меньшая по длине зона устойчивости мультиплекса II с модами TEM_{01} , у которых в окрестности точки сингулярности существует кольцевая зона с повышенным значением интенсивности. В силу этого образующие пучки данного мультиплекса имеют большую угловую расходимость, обуславливающую уширение дислокаций при больших расстояниях от начальной плоскости. В то же время следует заметить, что на малых расстояниях от нее ($z < 420$) размеры дислокаций увеличиваются гораздо медленнее. В некоторых случаях, когда нет необходимости передавать излучение на большие расстояния, более предпочтительно использование мультиплекса второго типа.

Система со спеклоподобными образующими пучками допускает определенную модернизацию с точки зрения уменьшения размеров дислокаций путем использования процедуры Герцберга-Секстона. Однако она имеет крайне низкую структурную устойчивость из-за малого свободного пробега дислокаций и их неупорядоченного смещения.

На заключительном этапе выполнения работы был более подробно рассмотрен вопрос о том, как на полученные результаты будет влиять изменение соотношения между размером дислокации

и размером отдельной ячейки мультиплекса a . Было установлено, что при изменении этого соотношения более чем в два раза в ту или иную сторону по отношению к ранее задаваемому по-прежнему наиболее устойчивым мультиплексом будет мультиплекс первого типа.

Рассмотренные световые структуры могут быть реализованы на практике путем использования пространственных модуляторов света [9], часто применяющихся в оптическом эксперименте. Разработанные в данной статье вычислительные алгоритмы могут стать основой для их программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брянецев Б.С., Калинович А.А., Захарова И.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 1. С. 6; *Bryantsev B.S., Kalinovich A.A., Zakharova I.G.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 1. P. 1.
2. Вохник О.М., Короленко П.В., Кубанов Р.Т. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 11. С. 1602; *Vokhnik O.M., Korolenko P.V., Kubanov R.T.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 11. P. 1327.
3. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985. 248 с.
4. Зотов А.М., Короленко П.В., Павлов Н.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 11. С. 1617; *Zotov A.M., Korolenko P.V., Pavlov N.N.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 11. P. 1341.
5. Тычинский В.П. // УФН. 2008. Т. 178. № 11. С. 1205; *Tychinskii V.P.* // Phys. Usp. 2008. V. 178. No. 11. P. 1161.
6. Dufresne E.R., Grier D.G. // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69. No. 5. P. 1974.
7. Скиданов Р.В., Рыков М.А. // Комп. оптика. 2013. Т. 37. No. 4. С. 431.
8. Короленко П.В. Когерентная оптика: учебное пособие для вузов. Юрайт, 2020. 184 с.
9. Tsutomu Hara // Japan. J. Appl. Phys. 2022. V. 61. No. SK. Art. No. SK0802.

Optical properties of multiplex vortex structures

A. M. Zotov^a, P. V. Korolenko^{a, *}, N. N. Pavlov^a

^a *Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^{*}*e-mail: pykorolenko@rambler.ru*

As applied to various applied problems, a group of questions on optimizing the characteristics of vortex light beams used in multiplex optical systems is considered. A new method is proposed for the formation of systems of singular beams with small-scale dislocations, which provide a high degree of stability of their structure to the influence of diffraction effects.