

Влияние регулярных возмущений волнового фронта на преобразование структуры лазерных пучков

В.А.Гурашвили, А.М.Зотов, П.В.Короленко, Н.Э.Саркаров

Исследовано влияние регулярной модуляции фазы на динамику изменения пространственных характеристик лазерного излучения. Рассмотрены процессы и условия трансформации фазовых aberrаций в топологические возмущения волнового фронта, связанные с образованием краевых и винтовых дислокаций. Обсуждается вопрос о соотношении и взаимосвязи каустических и дислокационных элементов в излучении лазера. Показано, что фазовая модуляция приводит к формированию в лазерных пучках узких каналов с повышенной интенсивностью.

Ключевые слова: лазерное излучение, дислокация волнового фронта, каустика.

Выходные пучки лазеров часто имеют квазирегулярную модуляцию волнового фронта (ВФ). В газовых лазерах с движущейся активной средой такую модуляцию могут вызывать неоднородности, возникающие под действием периодической сопловой решетки [1], под влиянием страт и доменов в газовом разряде [2], в результате наложения ударных волн [3, 4], а также под действием ряда других физических факторов. Модуляция ВФ выходных лазерных пучков в литературе чаще всего рассматривается как фактор, влияющий прежде всего на расходимость излучения.

Гораздо меньше внимания уделяется анализу метаморфоз структуры ВФ, условиям появления и взаимосвязи каустических и фазовых дислокационных образований в лазерных пучках. Такого рода образования регистрируются в излучении лазеров с самыми разными оптическими резонаторами [5, 6]. В настоящей работе рассматриваются качественные изменения амплитудно-фазовой структуры лазерных пучков, первоначально обладающих плавной регулярной модуляцией ВФ.

Общее представление о характере рассматриваемых процессов можно получить на примере известной задачи [7] о распространении безграничной волны, фаза которой в начальной плоскости меняется по гармоническому закону. Амплитуда такой волны имеет следующий вид:

$$\Psi = \exp\left(\frac{im}{2} \sin \frac{2\pi x}{a}\right), \quad (1)$$

где m – параметр, характеризующий глубину фазовой модуляции; x – поперечная координата; a – период модуляции. На расстоянии z от начальной плоскости поле можно представить в виде суперпозиции плоских волн [7]:

$$\Psi = \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q(m/2) \exp\{i[kz \cos(q\alpha) + kx \sin(q\alpha)]\}, \quad (2)$$

где J_q – функция Бесселя порядка q ; $\alpha = \lambda/a$; k – волновое число. Это поле является частным случаем самовоспроизводящихся полей, свойства которых нашли применение в лазерной технике [8, 9]

Используя для расчета характеристик поля его разложение по плоским волнам (2), а также лучевой метод из работы [10], можно установить основные особенности трансформации первоначального распределения амплитуды и фазы. Расчеты показывают, что даже при малой глубине модуляции фазы и равномерном распределении интенсивности в начальной плоскости дифракционные эффекты приводят к значительному пространственному перераспределению интенсивности.

Перераспределение наиболее заметно вблизи плоскостей $z = (2n + 1)a^2/2\lambda$ ($n = 0, 1, 2, \dots$). Эти плоскости располагаются между плоскостями, в которых, согласно эффекту Тальбо, воспроизводится первоначальное равномерное распределение интенсивности. Так, при $m = 0.1$ контраст картины распределения интенсивности $K = I_{\max}/I_{\min} = 1.28$, а при $m = 0.5$ контраст $K = 2.82$. С превышением определенной критической глубины модуляции в структуре волны происходят качественные изменения. При $m > 1$ в поле волны появляются клогообразные каустики [10], а при $m > \pi/2$ вблизи образующих каустик начинают формироваться краевые дислокации (КД) волнового фронта.

На рис.1 приведены распределения амплитуды A и фазы Φ на расстояниях $z = (2n + 1)a^2/2\lambda$ при разных первоначальных глубинах модуляции фазы. Видно, что при превышении критической глубины модуляции появляются линии с нулевыми амплитудами. В распределении фазы им соответствуют КД, обусловленные скачкообразным изменением фазы на π . КД располагаются симметрично относительно осей клогообразных каустик. Клово каустик, находящиеся сначала вблизи плоскостей $z = (2n + 1)a^2/2\lambda$, с дальнейшим увеличением глубины фазовой модуляции приближаются к плоскостям воспроизведения первоначальной структуры. При этом растет и число КД.

Их расположение по отношению к образующим каустик соответствует рассчитанной на основе интеграла Перси фазовой структуре поля, приведенной в работе [11].

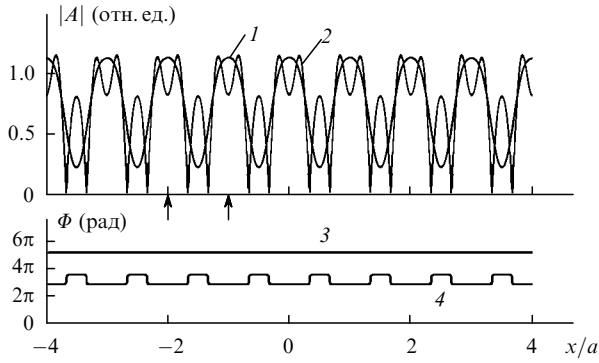


Рис.1. Распределение амплитуды A (1, 2) и фазы Φ (3, 4) по поперечной координате x для безграничной волны на расстоянии $z = (2n+1)a^2/2\lambda$ при $m = 1.2$ (1, 3) и π (2, 4); стрелками указано положение клювов каустик.

Продольная структура распределения интенсивности излучения показана на рис.2 для $m = 1.2$. Из него видно, что фазовая модуляция вызывает формирование каналов, вытянутых вдоль направления распространения, в которых интенсивность излучения существенно превышает среднюю. Оси этих областей совпадают с осями симметрии клювообразных каустик.

Если фазовая модуляция в начальной плоскости осуществляется не по одной, а по двум поперечным координатам, то появляется возможность формирования винтовых дислокаций (ВД) волнового фронта. ВД отличаются от КД принципиально иной топологической структурой (при обходе вокруг ВД фаза меняется на 2π). На рис.3,а приведена структура эквифазных линий ВФ в начальной плоскости, когда распределение поля задается формулой

$$\Psi(x, y) = \Psi(x, 0) + i\Psi(y, 0) + C. \tag{3}$$

Здесь функция $\Psi(y, 0)$ совпадает с функцией $\Psi(x, 0)$ при замене поперечной координаты x поперечной координатой y ; C – константа.

Структура эквифазных линий в начальной плоскости на рис.3,а построена с помощью формулы (3) для $C = 0.2$ и $m = 2$. Ход линий свидетельствует о наличии плавных регулярных возмущений волнового фронта. На рис.3,б изображена структура эквифазных линий на расстояниях $z = (2n + 1)a^2/2\lambda$. ВД располагаются в точках пересече-

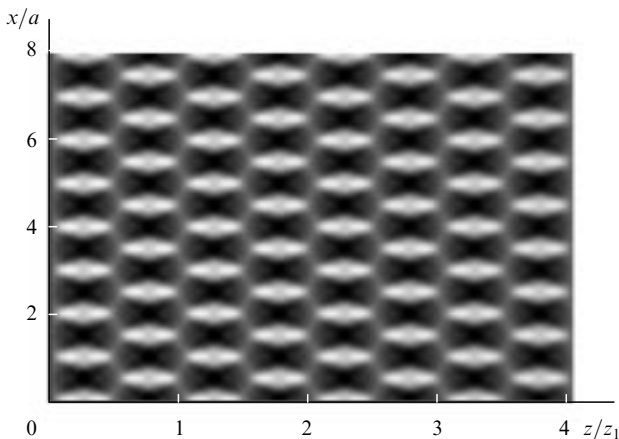


Рис.2. Продольное распределение интенсивности для безграничной волны при $m = 1.2$, $z_1 = 2a^2/\lambda$.

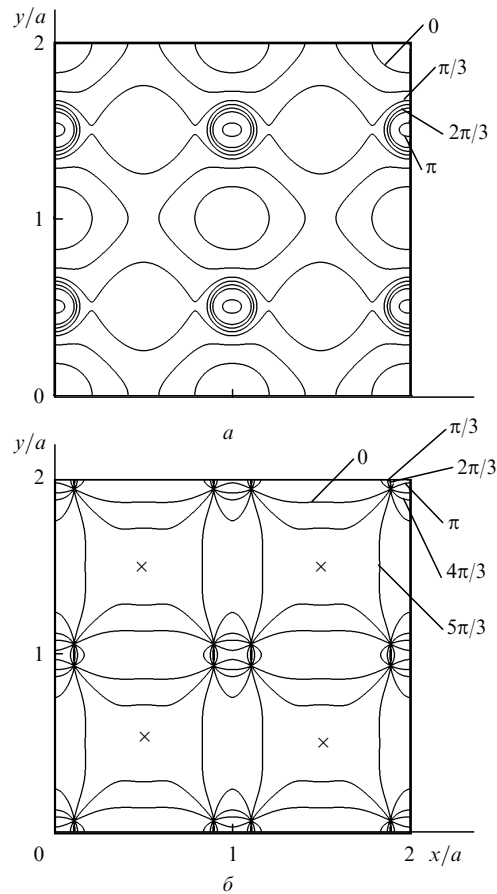


Рис.3. Структура эквифазных линий в начальной плоскости (а) и на расстояниях $z = (2n + 1)a^2/2\lambda$ (б) (крестики указывают на положение осей каустик).

ния эквифазных линий. Они образуют своеобразные квадруполи, каждый из которых состоит из четырех ВД. Две из них имеют положительный знак (являются «правыми»), две – отрицательный знак (являются «левыми»). Квадруполи окружают оси каустик.

В отличие от КД, каждая из которых, строго говоря, формируется в определенной плоскости $z = \text{const}$, ВД характеризуются определенной продольной длиной. Как и КД, дислокации винтового типа возникают лишь при превышении глубиной первоначальной модуляции волнового фронта некоторого критического значения. Если обозначить через $\Delta\Phi$ разность между максимальной и минимальной фазами в начальной плоскости (при модуляции по одной координате $\Delta\Phi$ совпадает с m), то ВД будут возникать, когда $\Delta\Phi > \pi/2$.

Все вышеперечисленные эффекты были проанализированы применительно к пространственно-ограниченному пучку с гауссовым профилем распределения интенсивности. В основу расчета была положена формула (2), в которой суперпозиция плоских волн была заменена системой распространяющихся под углом друг к другу гауссовых мод свободного пространства [12]. Горловины мод располагались в начальной плоскости.

Расчеты показали, что переход к более точной модели гауссова пучка с периодической модуляцией ВФ не вносит существенных качественных изменений в данные о преобразовании амплитудно-фазового распределения, по крайней мере на расстояниях, сопоставимых с характерной длиной a^2/λ . Как и в случае безграничной волны, дислокации ВФ начинают формироваться в ближней зо-

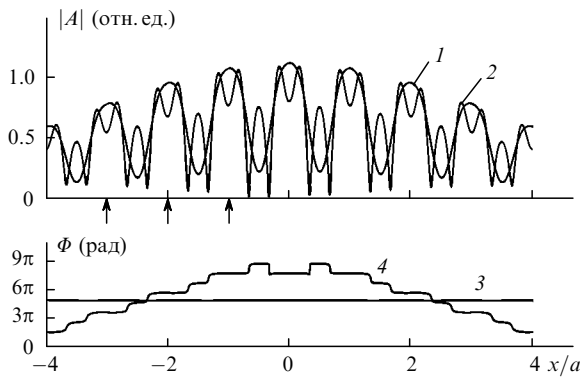


Рис.4. Распределение амплитуды A (1, 2) и фазы Φ (3, 4) по поперечной координате x для гауссова пучка на расстоянии $z = a^2/2\lambda$ ($w_0 = 5a$) при $m = 1.2$ (1, 3) и π (2, 4).

не, когда глубина модуляции фазы превышает $\pi/2$. Сказанное иллюстрирует рис.4, который является аналогом рис.1 для гауссова пучка. Отношение радиуса пучка в горловине w_0 к периоду модуляции a равно пяти.

Из сравнения рис.1 и 4 видно, что имеющиеся в них различия проявляются в дифракционном «замывании» части дислокаций. Различия усиливаются с ростом координаты z по мере того, как ухудшается периодическая воспроизводимость первоначальной структуры поля. Это видно, в частности, из рис.5, на котором изображено продольное распределение интенсивности для параметров $m = 1.2$ и $w_0/a = 5$.

Распределения, приведенные на рис.2 и 5, близки лишь в ближней зоне, для которой характерны узкие зоны, где концентрируется энергия светового потока. В дальней зоне дифракции перекрытие гауссовых угловых компонент излучения ослабевает и структура излучения кардинальным образом отличается от структуры безграничной волны: излучение представляет собой «веер» пучков, интенсивность которых убывает с увеличением угла наклона.

Фазовая модуляция гауссова пучка по двум поперечным координатам, если ее глубина превышает указанную выше критическую глубину, приводит к появлению на волновом фронте ВД. Как и в безграничной волне, эти ВД обладают определенной продольной длиной, увеличивающейся с ростом глубины модуляции. Это свойство ВД значительно облегчает их экспериментальное обнаружение. В дальней зоне дифракции вследствие изменения фазы в начальной плоскости по двум координатам будут формироваться два веера пучков, располагающихся во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Заметим в заключение, что результаты выполненного анализа могут быть частично перенесены и на случай нерегулярной плавной модуляции ВФ, если длина рассматриваемой пространственной области сопоставима с величиной a_n^2/λ , где a_n – характерный размер нерегулярных возмущений ВФ. В частности, это относится к образованию в световом поле каналов с повышенной интенсивностью и к появлению дислокаций волнового фронта при превышении фазовыми возмущениями определенного значения.

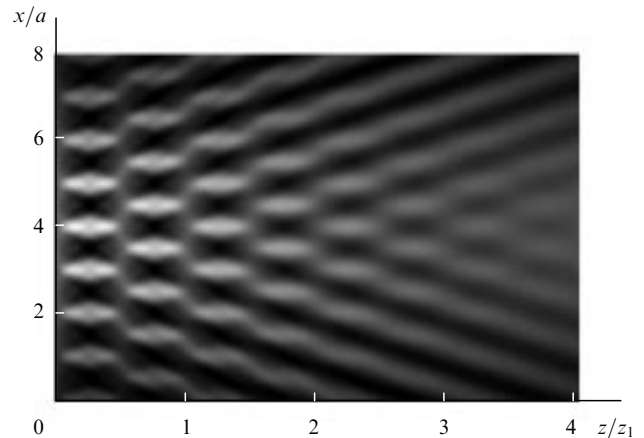


Рис.5. Продольное распределение интенсивности для гауссова пучка при $m = 1.2$, $w_0 = 5a$.

Таким образом, плавные возмущения ВФ играют важную роль в трансформации амплитудно-фазового профиля излучения и в формировании каустических и дислокационных образований. Появление каустик и дислокаций волнового фронта носит пороговый характер и непосредственно связано с глубиной первоначальной модуляции фазы. Для практики важным является то, что появление указанных образований в лазерном пучке сопряжено с формированием узких каналов, в которых интенсивность излучения значительно превышает среднюю.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной научно-технической программы «Физика квантовых и волновых процессов» (проект 1.61) и физического учебно-научного центра «Фундаментальная оптика и спектроскопия».

1. Александров Б.П., Степанов А.А., Трошенков С.Б., Щеглов В.А. *Квантовая электроника*, **27**, 216 (1999).
2. Веденов А.А. *Физика электроразрядных СО₂-лазеров* (М., Энергоиздат, 1982).
3. Лосев С.А. *Газодинамические лазеры* (М., Наука, 1977).
4. Бредерлов Г., Филл Э., Витте К. *Мощный иодный лазер* (М., Энергоиздат, 1985).
5. Короленько П.В., Тихомиров В.Н. *Квантовая электроника*, **18**, 1139 (1991).
6. Бобров Б.Д., Дмитриев Е.И., Снежков Г.Ю. *Квантовая электроника*, **20**, 686 (1993).
7. Гудмен Дж. *Введение в фурье-оптику* (М., Мир, 1970).
8. Марченко В.Г. *Квантовая электроника*, **8**, 1037 (1981).
9. Лиханский В.В., Напартович А.П. *УФН*, **160**, 101 (1990).
10. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. *Геометрическая оптика неоднородных сред* (М., Наука, 1980).
11. Бреховских Л.М. *Волны в слоистых средах* (М., изд. АН СССР, 1957).
12. Маркузе Д. *Оптические волноводы* (М., Мир, 1974).

V.A.Gurashvili, A.M.Zotov, P.V.Korolenko, N.E.Sarkarov. Effect of regular wavefront perturbations on the structural transformation of laser beams.

The effect of a regular phase modulation on the dynamics of variation in spatial characteristics of laser radiation is studied. The conditions and processes of the transformation of phase aberrations to topological wavefront perturbations resulting in the appearance of edge and screw dislocations are considered. The relationship between the caustic and dislocation elements of the laser beam is discussed. It is shown that the phase modulation leads to the formation of narrow channels with an increased intensity inside the laser beam.