

07

© 1990 г.

## ОБ АБЕРРАЦИОННОМ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

*С. А. Визнюк, С. Ф. Растанов, А. Т. Суходольский*

Представлены результаты экспериментов и расчета по исследованию абберрационного характера преобразования гауссовых лазерных пучков на искривленном в результате лазерного нагрева профиле поверхности тонкого слоя вязкой жидкости. Проведен численный расчет абберрационной картины при термокапиллярном преобразовании как в приближении геометрической оптики, так и с помощью расчета интеграла Кирхгофа по измеренному профилю термокапиллярной линзы.

### Введение

Ранее были описаны эксперименты по термокапиллярному механизму самовоздействия лазерных пучков в тонких слоях поглощающей жидкости [1-3]. Их теоретическое описание основывалось на формуле из [4] для нестационарного теплового поля, индуцированного гауссовым пучком, и выражении для формы профиля поверхности тонкого, неравномерно нагретого слоя жидкости [5], полученного в приближении малых чисел Рейнольдса. Расчет стационарной формы поверхности тонкого слоя вязкой жидкости при термокапиллярном самовоздействии гауссовых пучков с учетом решения тепловой и гидродинамической задач в случае аксиальной симметрии был проведен в [6]. Поскольку в этих работах нет количественного описания абберрационного преобразования лазерных пучков и, кроме этого, кольцевую структуру в преобразованном пучке иногда приписывают появлению «выпуклости» в центре термокапиллярной линзы [7], что не следует из результатов [6], то представляет интерес провести дополнительные измерения профилей поверхности, а также выполнить численный расчет абберрационной картины.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов и расчета по исследованию абберрационного характера преобразования гауссовых лазерных пучков на искривленном в результате лазерного нагрева профиле поверхности тонкого слоя вязкой жидкости. Был проведен численный расчет абберрационной картины при термокапиллярном преобразовании как в приближении геометрической оптики, так и с помощью расчета интеграла Кирхгофа по измеренному профилю термокапиллярной линзы.

### Эксперимент

В качестве лазера накачки использовались аргоновый лазер с мощностью до 1 Вт и CO<sub>2</sub> лазер мощностью до 3 Вт, излучение которых посылалось вертикально на слой жидкости, помещенный в чашку Петри. В качестве поглощающей жидкости использовались технические масла с вязкостью 50—500 мПа·с, коэффициентом поглощения  $\sim 10 \text{ см}^{-1}$  на длине волны 0,488 мкм аргонового лазера и коэффициентом преломления  $\approx 1.5$ . Установившийся профиль поверхности исследовался с помощью зондирующего пучка от HeNe лазера, диаметр которого мог меняться с помощью телескопической системы от 50 мкм до 1 см. Измерение профиля поверхности осуществлялось путем сканирования тонким

пучком HeNe лазера вдоль плоскости подложки от центра термокапиллярной линзы и регистрации угла отклонения, преломленного на профиле линзы и нижней поверхности подложки пучка. Затем, зная смещение исходного пучка от центра термокапиллярной линзы и угол отклонения после преломления, вычислялся тангенс угла наклона профиля поверхности в точке падения зондирующего пучка, после чего интегрированием восстанавливалась форма термокапиллярной линзы.

На рис. 1, а, б представлены полученные таким способом формы поверхности при различных исходных параметрах. В случае б видно, что в центре образующейся термокапиллярной линзы, значительно большей по размеру, чем диаметр нагревающего пучка, проявляется дополнительная вогнутость поверхности с размером, примерно равным диаметру нагревающего пучка.

Следует заметить, что использовавшиеся при исследовании профилей термокапиллярной линзы плотности мощности накачки были такими, что отклонение зондирующего пучка за счет температурной зависимости показателя преломле-

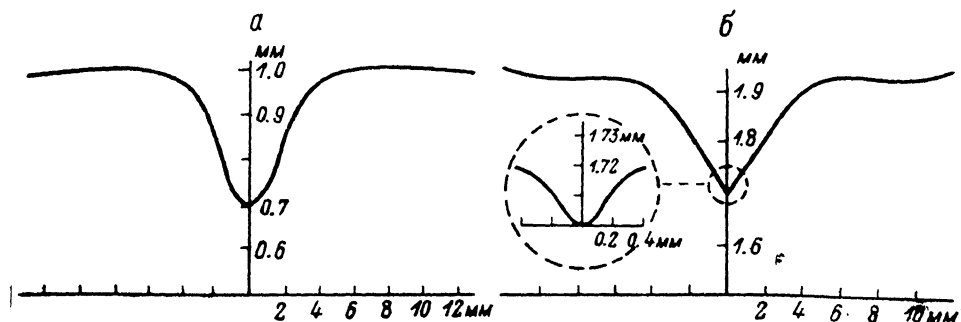


Рис. 1. Профили поверхностей, снятые экспериментально при использовании в качестве накачки пучка аргонового лазера диаметром 4 мм и мощностью  $\sim 100$  мВт при толщине слоя  $\sim 1$  мм (а) и при использовании сфокусированного до  $\sim 0.2$  мм пучка  $\text{CO}_2$  лазера мощностью  $\sim 100$  мВт при толщине слоя  $\sim 2$  мм (б).

Сбоку крупным планом показана центральная часть профиля.

ния жидкости даже в случае максимальной интенсивности (рис. 1, б) не превышало 5 % от наблюдавшегося в эксперименте отклонения. Это проверялось сравнением угла отклонения проходящего зондирующего пучка с углом, под которым он отражается от искривленной поверхности. Углы отклонения отраженного и прошедшего пучков при малых углах наклона профиля поверхности исследовавшихся термокапиллярных линз и при отсутствии термолинзы должны быть связаны между собой соотношением  $\varphi_{\text{прош}} = ((n-1)/2)\varphi_{\text{отр}}$ , где  $n$  — показатель преломления жидкости, что соблюдалось с точностью не хуже 5 %. Таким образом, измерение углов наклона профиля поверхности можно проводить как по прошедшему, так и по отраженному от поверхности пучку. В описываемом эксперименте схема «на проход» была более удобной, так как интенсивность прошедшего пучка значительно больше интенсивности отраженного.

Далее экспериментально исследовался вид абберационной картины на экране при зондировании в центре термокапиллярной линзы, образованной пучком аргонового лазера, пучком HeNe лазера при различных диаметрах последнего. Было обнаружено, что при диаметре пучка HeNe лазера, значительно меньшем, чем накачивающего пучка аргонового лазера, распределение интенсивности на экране близко к гауссову. При увеличении диаметра зондирующего пучка до диаметра накачивающего распределение интенсивности на экране постепенно приобретает вид обычной при термокапиллярном самовоздействии абберационной картины в виде расширяющихся от центра колец (см., например, [1]). При дальнейшем уширении зондирующего пучка абберационная картина трансформируется в систему колец в пределах одного широкого кольца с резкими краями и провалом интенсивности в центре (рис. 2, а). При этом было установлено, что за вгүтренний край кольца отвечают внешние участки зонди-

рующего излучения. Механизм образования такого распределения становится понятным, если рассмотреть ход лучей в термокапиллярной линзе и до экрана с учетом конечности размера самой линзы по сравнению с размером картины на экране (рис. 2, б). Видно, что в провал интенсивности на экране (рис. 2, а) может попасть только часть исходного пучка между центром и точкой перегиба профиля поверхности. При увеличении диаметра пучка уменьшается относительное количество энергии, приходящейся на эту часть экрана, и увеличивается количество энергии, приходящейся на некоторую кольцевую область, ограниченную снаружи лучами, преломившимися вблизи точки перегиба профиля поверхности (рис. 2, б).

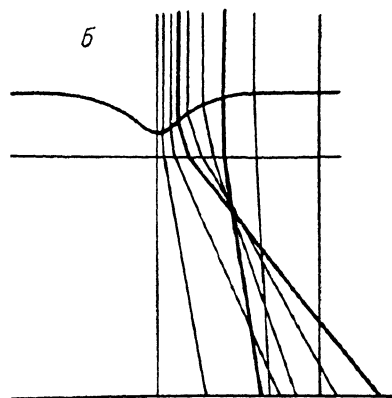
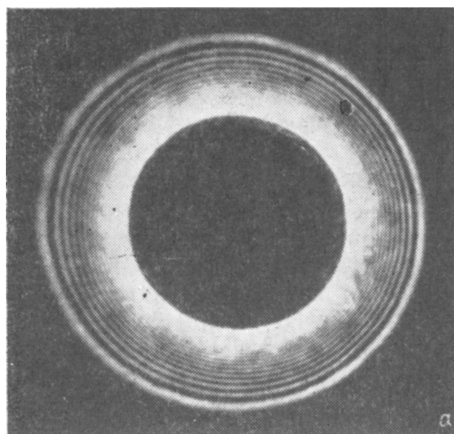


Рис. 2.

а — распределение интенсивности на расстоянии 75 см от термокапиллярной линзы, образованной пучком аргонового лазера диаметром ~2 мм (диаметр зондирующего пучка HeNe лазера ~10 мм, толщина жидкости 0.8 мм, диаметр картины 4,5 см); б — ход лучей в термокапиллярной линзе и до экрана, иллюстрирующий механизм образования такой aberrационной картины.

Кроме этого, экспериментально установлено, что при увеличении толщины слоя характер aberrационной картины усложняется. Вместо одного широкого кольца (рис. 2, а) появляется несколько перекрывающихся колец, каждое из которых содержит свою интерференционную структуру. Было установлено, что это вызвано формированием профиля поверхности, имеющего три и больше точек перегиба. В таблице приведены количество и положения точек перегиба про-

Толщина слоя, мм	Расстояние от точки перегиба с указанным порядковым номером до центра термокапиллярной линзы, мм						
	1	2	3	4	5	6	7
1.1	0.21	—	—	—	—	—	—
1.225	~0.73	~0.73	1.62	—	—	—	—
1.35	~0.88	~0.88	2.2	~3.55	~3.55	—	—
1.475	~0.35	~0.35	0.55	0.93	2.5	3.55	3.95
1.6	0.45	~0.95	~1.98	~1.98	~3.48	~3.48	4.23
1.725	0.26	~0.5	~0.5	0.96	2.13	3.26	4.08

Примечание. Диаметр нагревающего аргонового пучка 1.4 мм.

филя поверхности в зависимости от толщины слоя, определяемые с помощью описанного выше метода как экстремумы функции  $R(r)$ , где  $R=R(r)$  — расстояние от центра экрана до данной точки на экране, куда попадает луч, преломившийся в точке с координатой  $r$  на профиле. По-видимому, усложнение формы поверхности жидкости при увеличении толщины слоя обусловливается возрастанием роли вертикальной конвекции нагретой жидкости и ее конкуренцией с силой Марангони на поверхности.

В основу теоретического рассмотрения абберационного преобразования лазерных пучков положено решение прямой задачи волновой оптики путем расчета интеграла Кирхгофа [8]. Вначале было проведено численное решение интеграла Кирхгофа по профилю поверхности, описываемому формулой, полученной в [5]. При расчете анализировалось положение тех зон на поверхности, которые дают основной вклад в интеграл Кирхгофа. Оказалось, что эти зоны совпадают с окрестностями тех точек поверхности, лежащих по разные

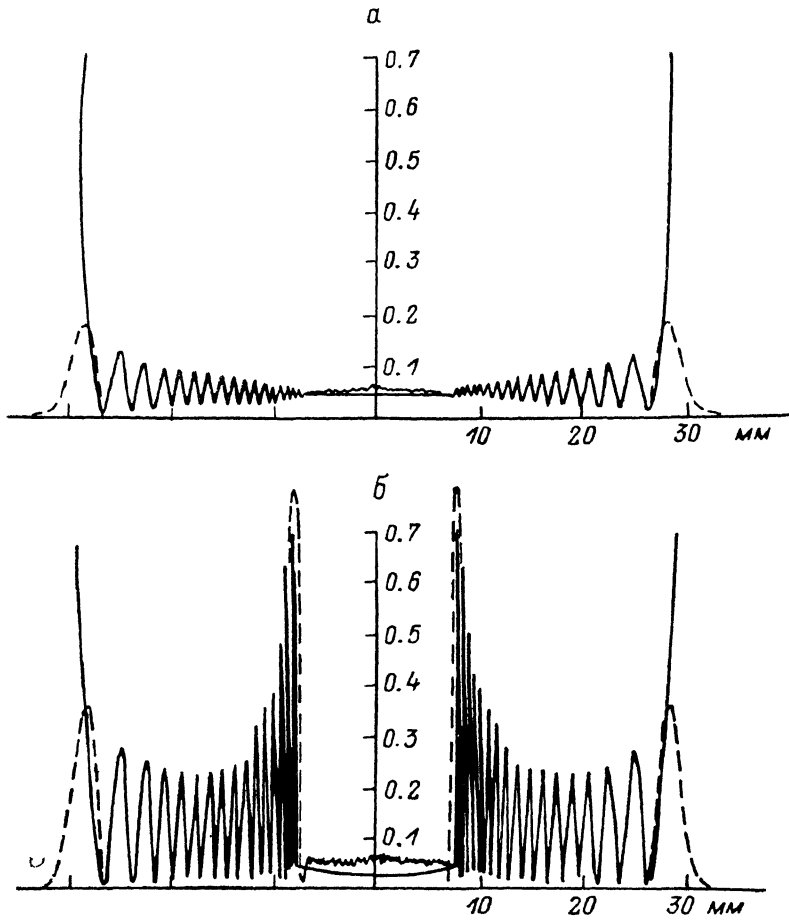


Рис. 3. Расчетное распределение интенсивности на экране при падении зондирующего пучка на профиль, показанный на рис. 1, а.

Расстояние до экрана 49 см. В целях получения более крупного масштаба колец длина волны зондирующего излучения бралась 6.333 мкм. Интенсивность пучка в обоих случаях одинакова. Штрихпунктир — результат расчета интеграла Кирхгофа. Радиус пучка 2 (а) и 5 мм (б).

стороны от точки перегиба профиля термокапиллярной линзы, через которые лучи, преломляясь, попадают в данную точку на экране. Поэтому можно сделать вывод, что кольцевая структура возникает за счет интерференции на экране преломленных от этих зон лучей. Следовательно, для наблюдения таких аббераций точка перегиба профиля поверхности должна находиться в пределах падающего лазерного пучка. Заметим, что ранее было получено аналогичное условие для возникновения кольцевой структуры при самовоздействии иной физической природы [9], что позволяет сделать вывод о сходности механизмов образования колец в обоих случаях.

Отсюда можно заключить также, что абберационная картина на экране (см., например, [1] и рис. 2, а) может быть получена в рамках геометрической оптики как результат указанной интерференции с учетом кривизны профиля.

Согласно этому выводу, был проведен расчет распределения интенсивности на экране при преломлении на экспериментально снятом профиле (рис. 1, а). Расчет основывался на поиске для каждой данной точки на экране тех точек на профиле, в которых преломляются падающие в данную точку на экране лучи. Результирующая интенсивность определялась интерференцией этих лучей с учетом различия их фаз и интенсивностей. Интенсивность интерферирующих лучей находилась из закона интенсивности [8] с учетом кривизны профиля поверхности в точке преломления. Окончательную интенсивность в данной точке на экране можно, таким образом, в случае декартовой системы координат представить в виде

$$I = I_0 \left| \sum_k e^{i \frac{2\pi}{\lambda} L_k} V \sqrt{e^{-\frac{r_k^2}{r_0^2}} \left( \frac{dR(r)}{dr} \Big|_{r=r_k} \right)^{-1}} \right|^2, \quad (1)$$

где суммирование производится по всем интерферирующим лучам,  $r_0$  — радиус пробного пучка,  $r_k$  — координата точки преломления  $k$ -го луча,  $L_k$  — оптическая длина для  $k$ -го луча, функция  $R(r)$  определена выше.

Результат расчета по формуле (1) приведен на рис. 3, а, б. Полученное распределение хорошо согласуется с экспериментально наблюдаемой интерференционной картиной (ср. рис. 2, а и рис. 3, б), однако на самом краю светового конуса, куда попадает луч, преломившийся вблизи точки перегиба профиля поверхности, имеется особенность, поскольку в рамках геометрической оптики интенсивность здесь стремится к бесконечности (так как здесь  $dR/dr = 0$ ). С целью нахождения интенсивности вблизи особой точки и проверки представленного выше подхода был проведен расчет интеграла Кирхгофа по экспериментально снятому профилю поверхности (рис. 1, а; штрихпунктирная кривая на рис. 3, а, б). Интеграл Кирхгофа рассчитывался по упрощенной формуле в приближении  $\cos(\varphi) \sim 1$ , где  $\varphi$  — угол раствора пучка после преобразования,

$$I = \text{const} \left| \int V \sqrt{e^{-\frac{r^2}{r_0^2}} e^{i \frac{2\pi}{\lambda} L(r)} dr \right|^2, \quad (2)$$

где  $L(r)$  — оптическая длина пути луча, проходящего от точки на профиле с координатой  $r$  до данной точки на экране с учетом толщины слоя жидкости. Сравнение результатов расчета интерференционной картины с помощью описанного выше метода по формуле (1) с помощью интеграла Кирхгофа по формуле (2) дало почти полное совпадение, за исключением областей вблизи резких внешнего (рис. 3, а, б) и внутреннего (рис. 3, б) краев.

### Выводы

В заключение отметим основные результаты данной работы. Экспериментально измерена форма профилей поверхности при различной толщине слоя жидкости и накачке излучением аргонового и  $\text{CO}_2$  лазера. Обнаружено, что при увеличении толщины слоя на профиле появляются дополнительные точки перегиба, т. е. форма профиля неоднократно меняет свою кривизну, что можно объяснить возрастанием роли конвекции при увеличении толщины и ее конкуренцией с силой Марангони на поверхности. Обнаружено, что при увеличении диаметра зондирующего пучка абберационная картина приобретает вид кольца с резкими внутренним и внешним краями и провалом интенсивности в центре. Дана интерпретация этого эффекта. Предложен метод расчета аббераций при термокапиллярном преобразовании лазерных пучков в рамках геометрической оптики. Проведен расчет интеграла Кирхгофа по теоретическому и экспериментально снятому профилю. Получено хорошее согласие с экспериментом. Кроме этого, полученные результаты могут служить основой для расчета асферических линз как абберационных оптических элементов, трансформирующих исходный гауссов пучок в пучок с наперед заданным распределением интенсивности.

### Список литературы

- [1] *Da Costa G., Galatroni J.* // Appl. Opt. 1979. Vol. 18. N 2. P. 233—235.
- [2] *Da Costa G.* // Phys. Lett. 1980. Vol. 80A. N 4. P. 320—322.
- [3] *Da Costa G.* // Phys. Lett. 1980. Vol. 80A. N 4. P. 323—324.
- [4] *Cohen M. I.* Laser handbook / Ed. F. T. Arecchi, E. O. Schulz-Dubois. Amsterdam, 1982. Vol. 2. P. 1578.
- [5] *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. Т. 6. 736 с.
- [6] *Визнюк С. А., Суходольский А. Т.* // Квантовая электрон. 1988. Т. 15. № 4. С. 767—770.
- [7] *Низовцев В. В.* // ИФЖ. 1988. Т. 55. № 1. С. 85—92.
- [8] *Бори М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
- [9] *Dabby F. W., Gustafson T. K., Whinnery J. R., Kohanzadeh Y.* // Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 16. N 9. P. 362—365.

Институт общей физики АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
2 января 1989 г.  
В окончательной редакции  
29 января 1990 г.

---