

ОБ АБЕРРАЦИЯХ ПРИ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОМ САМОВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С.А. Визнюк, С.Ф. Растопов, А.Т. Суходольский

Измерено распределение интенсивности пучка, отраженного от поверхности тонкого слоя жидкости. Показано, что для наблюдения кольцевой абберрационной структуры с резким краем достаточно наличия точки перегиба функции, описывающей профиль поверхности, в пределах падающего лазерного пучка.

Нелинейные оптические эффекты /1/ могут быть связаны с поведением оптических электронов отдельных молекул в сильном световом поле (генерация оптических гармоник, вынужденное комбинационное рассеяние и т.п.), а также с механическим (стрикционным или тепловым) влиянием излучения на свойства среды. Термокапиллярное самовоздействие света в тонких слоях жидкости происходит благодаря формированию криволинейного профиля поверхности жидкости за счет возникающего при нагреве градиента поверхностного натяжения /2/.

Расчет стационарного профиля свободной поверхности тонкого слоя жидкости на твердой подложке при воздействии гауссова лазерного пучка, основанный на совместном решении тепловой и гидродинамической задач, проведен в работе /3/. Представляет интерес исследовать абберрационные искажения исходного пучка при термокапиллярном самовоздействии. Кроме этого, в работе /4/ абберрации при самовоздействии объяснялись наличием в центре профиля поверхности "выпуклости", что противоречит результатам расчета /3/.

В данной работе экспериментально исследована деформация исходного гауссова распределения интенсивности в лазерном пучке при термокапиллярном самовоздействии. Наряду с этим представлены результаты расчета интеграла Кирхгофа с целью описания абберрационного преобразования исходного гауссова пучка. Показано, что для наблюдения кольцевой абберрационной картины достаточным условием является наличие в пределах падающего лазерного пучка точки перегиба функции, описывающей профиль поверхности.

Эксперимент проводился с использованием излучения непрерывного аргонового лазера максимальной мощностью до 1 Вт. Пучок, сфокусированный до диаметра 3 мм линзой с фокусным расстоянием 0,5 м, направлялся вертикально на слой масла толщиной 1 мм, находящийся на горизонтальной стеклянной подложке толщиной 0,5 см.

Исследовать абберрации при термокапиллярном самовоздействии лазерного пучка можно как в проходящем через слой жидкости, так и в отраженном от него свете. Но поскольку при наблюдении прошедшего пучка, на абберрации, создаваемые термокапиллярным механизмом, накладываются искажения, создаваемые обычной объемной термолинзой, которая дает похожую абберрационную структуру /5/, то исследования термокапиллярного механизма абберраций проводились для пучка, отраженного от поверхности жидкости.

Отраженный от поверхности жидкости с установившимся профилем световой пучок направлялся на экран, установленный на расстоянии 0,5 м. Распределение интенсивности отраженного света имело резкий край и ярко выраженную кольцевую структуру. На рис. 1а изображена денситограмма распределения светового поля вблизи края светового конуса, снятая путем сканирования узкой (0,2 мм) щели с установленным за ней фотодиодом. Исследовалась также зависимость угла раствора светового конуса отраженного пучка от интенсивности I падающего света (рис. 2а). При малых I угол раствора конуса линейно зависит от интенсивности падающего пучка, причем угол наклона составляет 0,6 рад/Вт.

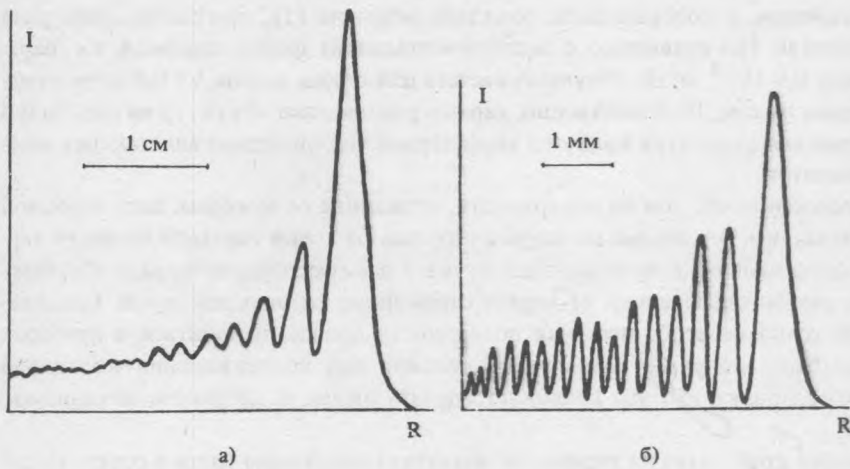


Рис. 1. а) Денситограмма распределения светового поля вблизи края светового конуса диаметром 14 см. б) Результат численного расчета интенсивности светового поля на экране (вблизи края), полученный при решении прямой задачи волновой оптики по профилю поверхности. Диаметр всего светового пятна равен 3 см.

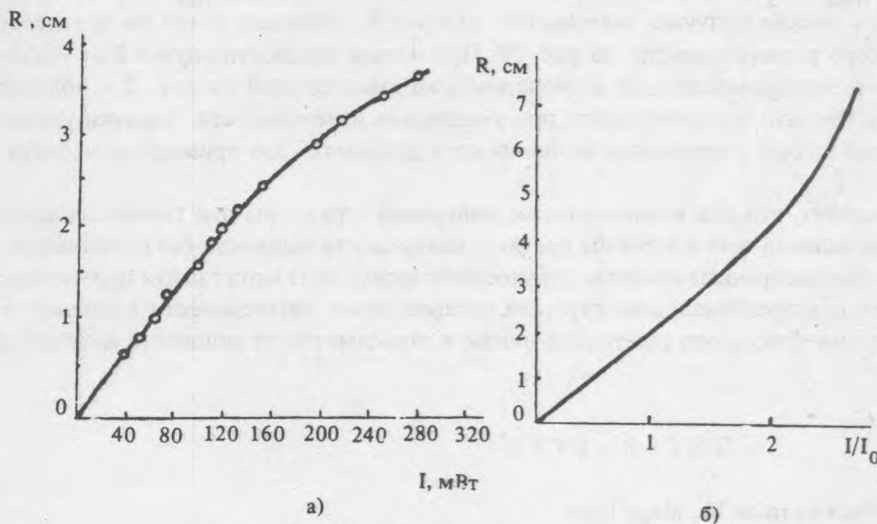


Рис. 2. Экспериментальная (а) и теоретическая (б) зависимости радиуса R светового пятна на экране от мощности I исходного пучка.

Для интерпретации эксперимента проведен численный расчет интеграла Кирхгофа [6] по профилю поверхности $h(x)$ тонкого слоя жидкости, полученного в предположении малости относительного изменения толщины слоя h_0 в области нагрева и в пренебрежении лапласовским давлением и изменением плотности ρ жидкости [7]:

$$h(x) = \sqrt{h_0^2 - (3\sigma a / \rho g) (T(x) - T_0)}, \quad a = -\sigma^{-1} \partial \sigma / \partial T, \quad (1)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения, g — ускорение силы тяжести, $h_0 = 1$ мм. Температурное поле $T(x)$ аппроксимировалось формулой, полученной в [3] для мощности пучка $I_0 = 0,6$ Вт:

$$T(x) = T_0 + T_{\max} e^{-(x/r_1)^2} + T_1 \frac{(x/r_2)^2}{1 + (x/r_2)^4}, \quad (2)$$

где $T_{\max} = 96$ °C, $T_1 = 10$ °C, $r_1 = 1,9$ мм, $r_2 = 3,5$ мм.

В целях удовлетворения приближениям, в которых была выведена формула (1), при расчете интеграла Кирхгофа использовалась более пологая (по сравнению с экспериментальной) форма профиля, т.е. параметр $3\sigma a/\rho g$ в (1) полагался равным $0,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{К}$. Результат расчета для длины волны $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ и расстояния до экрана $Z = 0,4 \text{ м}$ приведен на рис. 1б. Качественно, характер кольцевых структур на рис. 1а и б одинаков. Отсюда следует, что кольцевая структура является характерной чертой термокапиллярных линз как абберационных оптических элементов.

При расчете анализировалось положение тех зон на поверхности, отражение от которых дает основной вклад в интеграл Кирхгофа. Они оказались лежащими по разные стороны от точки перегиба профиля термокапиллярной линзы, зеркально отражающей часть падающего пучка в данную точку на экране. Поэтому кольцевая структура возникает за счет интерференции на экране отраженных от этих зон лучей. Следовательно, для наблюдения аббераций точка перегиба профиля поверхности должна находиться в пределах падающего лазерного пучка. Ранее было получено аналогичное условие для возникновения кольцевой структуры при тепловой самодефокусировке [5], что позволяет сделать вывод о сходности механизмов образования колец в обоих случаях.

Численно проверено, что положение края пятна на экране соответствует отражению света в точке максимального наклона профиля поверхности жидкости. Находя каждый раз положение точки перегиба в выражении (1) в зависимости от T_{max} и T_1 , а также пользуясь линейной зависимостью T_{max} и T_1 от интенсивности падающего пучка I [3], можно получить зависимость радиуса R светового пятна на экране от мощности I пучка. Результат такого расчета приведен на рис. 2б. При малых мощностях пучка R от I зависит линейно. Различный характер экспериментальной и теоретической зависимостей на рис. 2 в области больших мощностей обусловлен тем, что в эксперименте при увеличении интенсивности накачки уменьшается доля поглощенной энергии за счет уменьшения толщины слоя жидкости. Это приводит к нелинейной зависимости $T(x)$ от I .

Таким образом, в работе показано, что для возникновения кольцевой структуры при термокапиллярном самовоздействии достаточно наличия точки перегиба профиля поверхности жидкости без дополнительных "выпуклостей" в центре [4]. Рассмотренные свойства термокапиллярных линз могут найти применение в устройствах адаптивной оптики для преобразования гауссова распределения интенсивности в близкое к прямоугольному или для изменения фокусного расстояния линзы в зависимости от мощности исходного пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бломберг Н. Нелинейная оптика. М., Мир, 1966.
2. Galatroni J., Da Costa G. Opt. Commun., 42, 5 (1982).
3. Визнюк С. А., Суходольский А. Т. Квантовая электроника, 15, 767 (1988).
4. Низовцев В. В. Инженерно-физический журнал, 55, 85 (1988).
5. Dabby F. W. et al. Appl. Phys. Lett., 16, 362 (1970).
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., Наука, 1973.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика, т. 6, гидродинамика. М., Наука, 1986.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 18 января 1989 г.