

"БАНАНОВАЯ" САМОФОКУСИРОВКА ЛУЧЕЙ

Г.А.Аскарьян, В.В.Студенок

В большинстве задач самофокусировки (см. [1-4], обзор [5] и литературу в нем) были рассмотрены случаи, когда показатель преломления n увеличивался под действием поля луча ($\delta n > 0$), а интенсивность луча спадала от оси к краю ($\partial I / \partial r < 0$), что обеспечивало необходимое условие для самофокусировки $\partial n / \partial r < 0$ для всего сечения луча.

Однако в ряде практически интересных и распространенных сред при нагреве $\delta n < 0$ (например, в газах и жидкостях - воздух, вода) так как обычно $dn/dT < 0$ (если давление успевает выравняться) или $\partial n / \partial T^{\rho} < 0$ (для малых моментов времени $t \leq t_g = a/c_g$) поэтому для обычных лучей с интенсивностью, спадающей от оси должна быть расфокусировка (так как $\partial n / \partial r > 0$).

В данной статье впервые получена самофокусировка в воде и показано, что для большого класса лучей с немонотонной зависимостью распределения интенсивности (нарастание от оси к периферии и резкий спад после определенного радиуса r_m) должна наблюдаться самофокусировка части луча с $r < r_m$ и потерей боковой части луча с $r > r_m$ (обдирка луча как банана). При этом терпящей частью энергии луча можно пренебречь в случае резкого спада (когда $\int_{r_m}^{\infty} I r dr \ll \int_0^{r_m} I r dr$ особенно при наличии поглощения или рассеяния излучения в среде (а нас как раз будут интересовать диссипативные среды и диссипативные самофокусировки).

1. Получим профиль рефракции в предположении слабого обратного влияния рефракции на распределение луча (такое предположение обычно делается [8] при оценке начальной стадии процесса самофокусировки).

Допустим дана производная от показателя преломления среды по температуре $n'_T < 0$. Тогда для луча с распределением интенсивности $I(r, t)$ получим изменение показателя преломления

$$\delta n(r, t) = \frac{n'_T \kappa}{C \rho} \int_0^t I(r, t) dt = \frac{n'_T \kappa}{C \rho} q(r, t) = -\alpha q(r, t),$$

где C — теплоемкость среды, ρ — ее плотность, κ — коэффициент поглощения света, $q(r, t)$ — плотность прошедшей световой энергии. Из условия самофокусировки: $(\partial/\partial r) \delta n < 0$ получим $\alpha(\partial q/\partial r) > 0$, т.е. интенсивность света должна нарастать по радиусу.

Для заданного профиля $\delta n(r)$ имеем изменение угла наклона лучей $(\partial\theta/\partial z) \approx (\partial n/\partial r) = \partial \delta n/\partial r$; рассмотрим частные случаи фокусировки и соответствующие им распределения интенсивности.

Чтобы параллельный луч, падая на слой среды толщиной L сфокусировался на расстоянии L_f ($\gg L$), необходимо, чтобы

$$\delta\theta \approx (\kappa/L\rho) \approx Ln'_r, \text{ т.е. } L_f \approx \kappa/Ln'_r.$$

Из соблюдения этого условия для любого r получим $n'_r = A(t)r$.

Или

$$\delta n = \frac{1}{2} A(t)r^2 + B(t) = n'_T \delta T = \frac{n'_T \kappa}{C \rho} \int_0^t I dt,$$

т.е. $B(t) = \alpha \int_0^t I(0, t) dt$. Так как обычно

$$I(r, t) = I_m \phi(r) \psi(t) \quad \text{то} \quad \frac{1}{2} A(t)r^2 =$$

$$= \alpha I_m \{ \phi(r) - \phi(0) \} \int_0^t \psi(t) dt,$$

$$\text{т.е. } \phi(r) = \phi(0) + (\kappa/\alpha)^2; \text{ и } A(t) = \frac{2\alpha I_m}{a^2} \int_0^t \psi(t) dt,$$

где a — эффективный радиус луча, а ϕ и ψ — безразмерные функции. Следовательно

$$L_f(t) = \frac{1}{LA(t)} = \frac{a^2}{2\alpha I_m \int_0^t \psi(t) dt}$$

Обычно полагают $\psi(t)$ в виде $\psi(t) = 1$ для $0 < t < T$ (прямоугольный импульс) т.е. $\int_0^t \psi(t) dt = t$, или $\psi(t) = t/T_m$, для $0 < t < T_m$ в этом случае $\int_0^t \psi(t) dt = t^2/2T_m$; или $\psi(t) = \sin(\pi t/2T)$; $t < 2T_m$, тогда

$$\int_0^t \psi(t) dt = \frac{2T_m}{\pi} \left(1 - \cos \frac{\pi t}{2T_m}\right), \text{ т.е. в этих случаях } L_f \sim 1/t;$$

$$\sim \frac{1}{t^2}; \quad \sim \frac{1}{\sin^2(\pi t/4T_m)},$$

т.е. точка фокуса сделает прорыв от бесконечности к слою среды.

2. Был поставлен эксперимент для подтверждения рассмотренного процесса. Схема установки показана на рис.1. Использовался луч рубинового лазера с немодулированной добротностью с энергией 25 дж в миллисекундном импульсе. Формирование нужного профиля луча осуществлялось пропусканием луча через стеклянную пластинку с экраном в центре луча (в качестве экрана использовался шарик или диск диаметром 1,3 мм.) На расстоянии 70 см от экрана помещалась кювета с жидкостью длиной 15 см и на расстоянии 70 см от кюветы изображение луча после нескольких светофильтров фиксировалось на фото пленке. (На расстоянии до кюветы тень от экрана сглаживалась и получалось плавное распределение с минимумом в центре). При добавлении в жид-

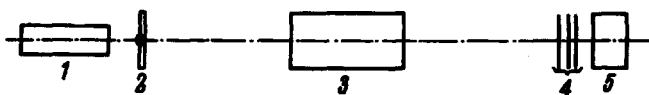


Рис.1. 1 – лазер, 2 – стеклянная пластинка с экраном, 3 – кювета с водой, 4 – набор фильтров, 5 – фотоаппарат или скоростной фоторегистратор (СФР)

кость в кювете поглощающего вещества (раствор медного купороса) картина изображения луча резко менялась – в центре появлялось пятно повышенной интенсивности. На рис. 2 см. вклейку показаны изображения для случаев: а – в кювете вода чистая, б и в – вода подкрашенная купоросом (длина поглощения примерно равна длине кюветы) (в – на пленке скоростного фоторегистратора).

Рассмотренные процессы самофокусировки¹⁾ могут расширить класс сред и диапазон условий, при которых проявится самофокусировка световых, радио и ультразвуковых лучей, как в импульсном, так и стационарном режиме. Специальный подбор профиля луча мощных газовых или твердотельных лазеров может существенно повлиять на их расходимость

1). Профиль $\delta n(r)$, остающийся после прохождения луча, может быть использован для уменьшения расходимости другого луча меньшего радиуса (в этом случае можно обеспечить волноводность или фокусировку без боковых потерь: о трубчатых световых лучах – волноводах см. [7]).

в воде и воздухе. Это явление может возникнуть самопроизвольно при наличии провалов в распределении интенсивности или после поглощающих центров в среде.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академия наук СССР

Поступила в редакцию
10 июня 1969 г.

Литература

- [1] Г.А.Аскарьян. ЖЭТФ, 42, 1567, 1962.
 - [2] В.И.Таланов. Изв. высш.уч.зав., Радиофизика, 7, 564, 1964.
 - [3] R. Chiao, E. Garmire, C. Townes. PRL, 13 479, 1964.
 - [4] Н.Ф.Пилипецкий, А.Р.Рустамов. Письма в ЖЭТФ, 2, 88, 1965.
 - [5] С.А.Ахманов, А.П.Сухоруков, Р.В.Хохлов, УФН, 93, 19, 1967.
 - [6] Ю.П.Райзер. ЖЭТФ, 52, 470, 1967.
 - [7] Г.А.Аскарьян. ЖЭТФ, 54, 1393, 1968.
-