

## ДИФРАКЦИОННЫЕ МНОГОДОМЕННЫЕ ЛАЗЕРО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ СТРУКТУРЫ В ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

© *О.А.Гуназе, В.А.Трофимов*

Воздействие лазерного излучения на химические реакции в газовой среде является одним из эффективных способов управления ими [1-3]. С другой стороны, оно представляет собой характерный пример оптически бистабильной (ОБ) системы на основе возрастающего поглощения [1].

С уменьшением начального радиуса пучка появляется необходимость учета дифракции и самовоздействия оптического излучения при его распространении в ОБ безрезонаторной системе. Важно также подчеркнуть, что в процессе взаимодействия дифракционная длина пучка уменьшается как из-за уменьшения его поперечных размеров вследствие поглощения световой энергии, так и из-за его разбиения на части, вызванного выеданием его энергии в области с максимальной интенсивностью. Поэтому влияние дифракции может быть существенным, даже если первоначально дифракционная длина в несколько раз превышает длину кюветы.

Отметим, что дифракция и самовоздействие оптического излучения могут принципиально изменить как динамику взаимодействия, так и пространственное распределение областей высокого поглощения в ОБ системе [4,5]. Так, например, имеет место пространственно-временная неустойчивость гауссова пучка при прохождении границы домена

высокого поглощения [4]. В случае воздействия шелевого пучка, реализуемого, если его радиус по одной из поперечных координат значительно превосходит его радиус по другой координате, на химически активную газовую смесь, формируется сложная пространственная структура области высокой концентрации продукта реакции, обусловленная дифракцией оптического излучения на двух щелях [5]. В настоящей работе изучается пространственно-временная эволюция областей высокого поглощения, формируемых осесимметричными коллимированными трубчатыми световыми пучками. Показано, в частности, что при некоторых условиях в динамике формируются две области высокой концентрации продукта реакции соответственно у задней и передней стенок кюветы. Дифракция пучка может приводить к формированию нескольких локальных максимумов концентрации продукта реакции. Возможно также изменение направления движения волны поглощения при формировании кинков концентрации продукта реакции в приосевой области пучка.

Исследуемый нами процесс описывается следующей системой безразмерных уравнений:

$$\frac{\partial A}{\partial x} + iD\Delta_{\perp}A + \delta_0NA = 0, \quad 0 < z \leq 1,$$

$$\varepsilon \frac{\partial T}{\partial t} = \chi\Delta_{\perp}T + qN|A|^2 + \gamma f, \quad \Delta_{\perp} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right), \quad t > 0,$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D_N\Delta_{\perp}N + f, \quad f = (1-N) \exp\left(-\frac{1}{T}\right) - kN \exp\left(-\frac{T_c}{T}\right) \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$A|_{z=0} = A_0(r)\sqrt{I_0(t)}, \quad A_0(r) = \frac{1}{Q} \frac{r^2}{a^2} \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right),$$

$$I_0(t) = (1 - \exp(-t/\tau))^2, \quad \tau = 0.1,$$

$$A|_{r=R} = \frac{\partial A}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0,R} = \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = -\eta(T - T_0), \quad T|_{t=0} = T_0, \quad f|_{t=0} = 0. \quad (2)$$

Описание параметров (1), (2) подробно дано в [5]. Поэтому здесь отметим лишь, что  $A$  — нормированная комплексная амплитуда пучка;  $N$  — безразмерная концентрация продукта реакции;  $T$  — нормированная температура

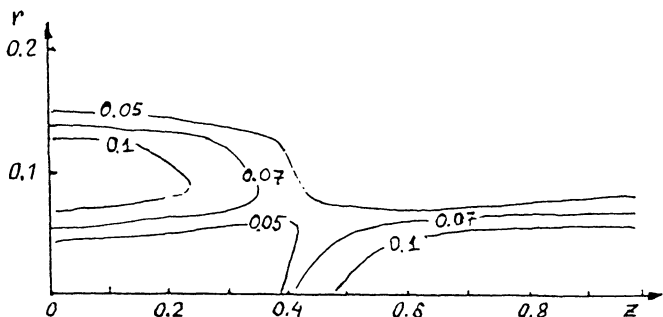


Рис. 1. Линии уровней концентрации продукта реакции на плоскости  $(r, z)$ , реализуемых в момент времени  $t = 50$  для параметров  $q = 5$ ,  $\delta_0 = 8$ ,  $D = 0.0025$ ,  $k = 5$ . Значения концентрации указаны на рисунке. Параметр  $Q$  в (2) соответствует значению, при котором входная мощность распределения  $A_0(r)$  равна мощности гауссова пучка.

среды;  $z$  — продольная координата, нормированная на дифракционную длину;  $q$  характеризует входную мощность пучка,  $Q$  — параметр нормировки.

Ограничимся рассмотрением взаимодействия со следующими фиксированными параметрами:

$$\varepsilon = 1, \quad D_n = \chi = 10^{-5}, \quad T_c = 0.375, \\ T_0 = 0.125, \quad a = 0.1, \quad \gamma = 0, \quad q = 5.$$

Прежде всего отметим, что в процессе взаимодействия (например, для  $\delta_0 = 8$ ,  $d = 0.00025$ ,  $k = 5$ , см. рис. 1) формируются два домена высокой концентрации продукта реакции, которые существуют достаточно продолжительное время, определяемое коэффициентами реакции и дифракцией оптического излучения. В дальнейшем из-за диффузии вблизи входного сечения кюветы в приосевой области пучка значение  $N$  может возрастать. Сформированный же вблизи выходного сечения кюветы вследствие фокусировки первоначально трубчатого пучка второй домен высокой концентрации расширяется в направлении входа в кювету из-за движения фокуса пучка навстречу его распространению (данный эффект наиболее хорошо наблюдаем для  $k < 1$ , например  $k = 0.5$ ). В результате формируется домен с платообразным распределением в пределах всей приосевой области вдоль кюветы.

Дифракция светового пучка при определенных условиях на параметры взаимодействия приводит к формированию динамических максимумов концентрации в приосевой области среды. В качестве иллюстрации приведен рис. 2, на

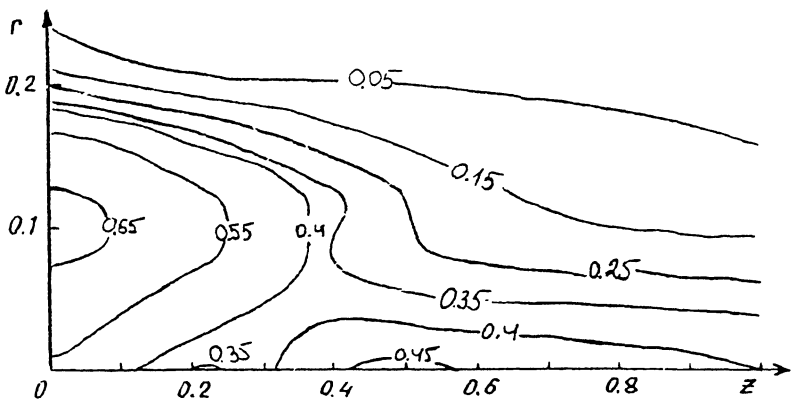


Рис. 2. Линии уровней концентрации продукта реакции, аналогичные рис. 1 при  $k = 0.5$  и  $Q = 1$ . Остальные значения параметров совпадают.

котором видны две приосевые области максимума концентрации продукта реакции. Первый максимум обусловлен собственно фокусировкой пучка за счет его начальной трубчатой структуры вблизи сечения  $z = 0.5$ . Второй же максимум связан с диффузионными потоками концентрации вблизи входного сечения в область, не освещенную пучком. Заметим, что при уменьшении коэффициента поглощения (например, до  $\delta_0 = 4$ ) минимум концентрации вблизи сечения  $z \approx 0.2$  сдвигается ближе к сечению  $z = 0$ , а локальный максимум вблизи сечения  $z \approx 0.5$  исчезает. Это обусловлено тем, что  $\delta_0$  определяет градиент изменения концентрации, а следовательно, при постоянной дифракции пучка, и вносимый наклон волнового фронта при его падении на границу области с более высоким значением  $N$ , поэтому с уменьшением  $\delta_0$  фокусировка пучка будет происходить на более длинных трассах.

Еще одна особенность лазеро-индуцированной кинетики химической реакции состоит в трансформации кинка концентрации в приосевой части пучка. При малой дифракции (например,  $D = 0.0025$ ) пучок фокусируется на выходную грань кюветы (рис. 3, а) и его интенсивность здесь выше, чем на входе в кювету. Поэтому именно здесь сначала возрастает концентрация продукта реакции и формируется приосевой "обратный" кинк. В течение длительного промежутка времени (примерно 60 безразмерных единиц) в среде будут существовать две области высокого поглощения (рис. 2). Затем по мере роста кинка вблизи входного сечения в конце кюветы рост концентрации сначала прекращается.

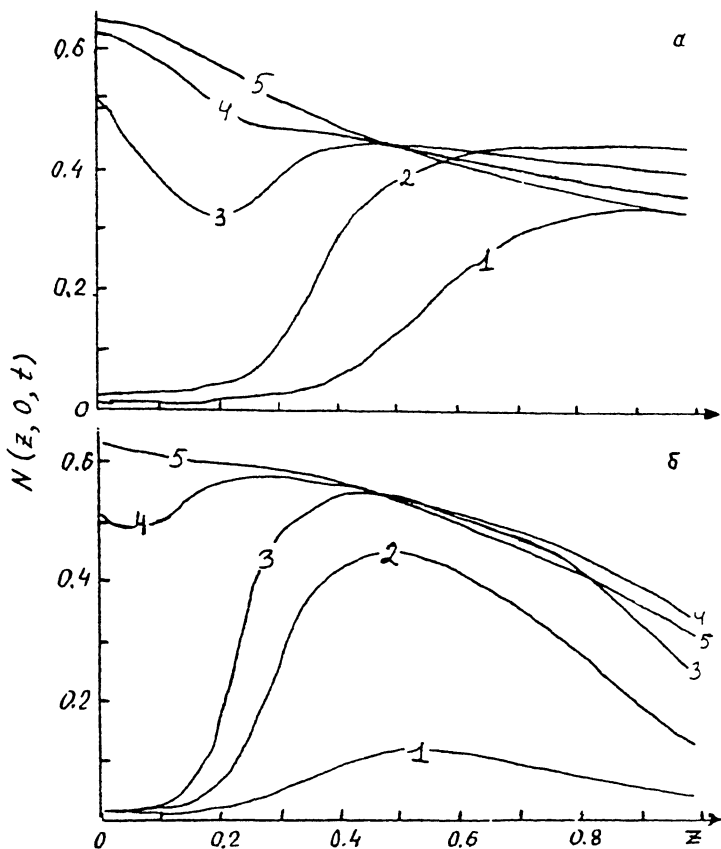


Рис. 3. Эволюция вдоль  $z$  значения концентрации продукта реакции, достигаемого на оси пучка ( $r = 0$ ) при следующих параметрах взаимодействия:  $q = 5$ ,  $\delta_0 = 8$ ,  $k = 0.5$ ,  $Q = 1$  при  $D = 0.0025$  (а) в моменты времени  $t = 15$ (1), 25 (2), 50 (3), 75 (4), 100 (5) и при  $D = 0.005$  (б) в моменты времени  $t = 10$  (1), 15 (2), 20 (3), 50 (4), 75 (5).

Для более высокого значения дифракции пучка взаимодействие происходит по-иному; максимум концентрации достигается сначала в середине кюветы (рис. 3, б). Затем по мере роста  $N$  вблизи сечения  $z = 0$  значение концентрации на оси кюветы увеличивается, а у выходного сечения кюветы из-за затухания оптической энергии уменьшается. Подчеркнем, что контрастность формируемых структур существенно зависит от параметров взаимодействия.

Таким образом, дифракция светового излучения в ОБ безрезонаторных системах может принципиально изменить как динамику формирования областей высокого поглоще-

ния, так и результирующее пространственное распределение характеристик среды. В результате ее действия увеличиваются энергозатраты на формирование областей высокого поглощения и время переключения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант N 95-02-04448-а).

### Список литературы

- [1] Бункин В.Ф., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1982. Т. 46. № 6. С. 1150-1169.
- [2] Бонч-Бруевич А.М., Либенсон М.Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1982. Т. 46. № 6. С. 1104-1118.
- [3] Ораевский А.Н., Проценко И.Е. // Труды ФИАН СССР. 1988. Т. 187. С. 144-177.
- [4] Захарова И.Г., Трофимов В.А. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 15. С. 43-48.
- [5] Гуназе О.А., Трофимов В.А. // Изв. РАН. Сер. Физическая. 1996. Т. 60. № 6.

Московский государственный  
университет  
им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию  
11 июня 1196 г.