

05:07

Бездиффузионный механизм движения доменов высокого поглощения вдоль оси распространения лазерного излучения

© В.А. Трофимов, Ю.В. Троцкий

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия
e-mail: vatro@cs.msu.su

(Поступило в Редакцию 28 октября 2002 г. В окончательной редакции 27 октября 2003 г.)

На основе компьютерного моделирования продемонстрировано существование нового механизма движения доменов высокого поглощения при воздействии гауссовых пучков и отсутствии диффузии характеристик среды вдоль направления распространения оптического излучения. Его суть заключается в зависимости скоростей роста коэффициента поглощения от световой интенсивности. В результате этого область высокого поглощения может перемещаться из области высокой интенсивности в менее освещенную часть среды.

Введение

Как известно, в задачах оптической обработки и хранения информации одной из ключевых проблем является ее надежность. Запись информации происходит при инициации, например, химических процессов [1–3], а для обработки информации используются различные бистабильные схемы (см., например, [4–6]). Характерной особенностью обоих процессов является реализация локализованных областей с существенно отличными от окружающей ее среды свойствами. В частности, ими могут быть домены высокой температуры среды, концентрации продукта химической реакции вследствие реализации оптической бистабильности (ОБ). В этом случае весьма важным является вопрос о возможности перемещения таких доменов, появления помимо основного домена дополнительного, а также о физических механизмах их реализации.

В литературе известно, что для оптически бистабильных систем с продольной диффузией домены могут перемещаться как вследствие фокусировки излучения в глубь среды [5]. В данной работе показано, что движение доменов возможно и по бездиффузионному механизму. Словом „бездиффузионный“ подчеркивается отсутствие продольной диффузии, так как диффузия характеристик среды в направлениях, перпендикулярных оси распространения излучения, учитывается. Следует также подчеркнуть, что некоторые виды движения границ области высокого поглощения в безрезонаторных системах без участия продольной диффузии описаны [7,8]. Так, при постоянном во времени росте входной интенсивности имеет место движение задней границы домена вдоль среды [4] на значительные расстояния. Перемещение же задней границы домена навстречу направлению распространения оптического излучения, имеющего постоянную интенсивность на входе в нелинейную среду, происходит и в процессе его формирования. Однако оно, как правило, не превышает нескольких процентов от продольного размера впоследствии сформировавшегося домена. Следует подчеркнуть, что характерной осо-

бенностью описанных в литературе случаев движения границ домена является неизменное положение его передней границы: она фиксирована и располагается у входа в нелинейную среду. Нас же будет интересовать возможность перемещения обеих границ области высокого поглощения на расстояния порядка или превышающие продольный размер домена. Такая ситуация, в частности, реализуется при воздействии световых пучков с эллиптическим начальным профилем. Он может сформироваться и при воздействии первоначально аксиально-симметричного пучка на оптическую систему хранения информации, например, из-за неточности его фокусировки в заданный пик или он может появиться при прохождении пучком неоднородной среды.

Эллиптичность профиля оптического излучения приводит к возможности реализации бистабильной зависимости, например температуры среды от радиуса пучка [9]. Причина этого заключается в различном влиянии радиусов эллиптического пучка на изменение его интенсивности и охлаждение среды из-за теплоотвода в поперечных к распространению излучения направлениях. В результате этого помимо формирования доменов высокой температуры (концентрации) из-за абсорбционного механизма появляются подобные же домены из-за бистабильной зависимости характеристик среды от радиусов пучка. Важно иметь в виду, что переключение из одного состояния в другое из-за последнего механизма бистабильности проявляется при меньших значениях интенсивности по сравнению с аналогичными значениями, имеющими место для абсорбционной бистабильности аксиально-симметричного пучка. Однако так как скорость нагрева среды (роста концентрации) зависит от интенсивности светового излучения, то формирование доменов вследствие эллиптичности профиля пучка происходит во времени, как правило, позже появления доменов из-за нелинейного поглощения. В зависимости от соотношения параметров взаимодействия оптического импульса со средой (эллиптичности профиля пучка, его интенсивности, времени теплоотвода и изменения концентрации и т.д.) дополнительные домены

могут появиться как до области перетяжки пучка, так и после нее [9–11]. Учитывая зависимость скорости формирования доменов от интенсивности и различие в интенсивностях переключения системы для обоих механизмов бистабильности в динамике, может иметь место движение доменов на значительные расстояния. Именно эта проблема анализируется в настоящей работе.

Важно также подчеркнуть, что рассматриваемый ниже случай взаимодействия оптического излучения с газом не ограничивает общности полученных результатов: они будут справедливы и при рассмотрении полупроводников и других сред. Принципиальным условием применимости полученных результатов является наличие нелинейной зависимости коэффициента поглощения среды от температуры или (и) концентраций продукты реакции (например, изменение состояния полимера), концентрации свободных электронов полупроводника и т.д. Нами же рассматривается газовая среда исходя из того, что ранее были детально изучены закономерности образования многодоменных структур [9–11]. Поэтому в данной работе и рассматривается взаимодействие оптического излучения со слоистой и непрерывной газовой средой.

Постановка задачи

Как уже отмечалось, рассмотрение проведем на примере воздействия оптического излучения на химически активную среду. При этом считаем, что в среде имеет место обратимая химическая реакция $A \leftrightarrow C$, где A — исходное вещество, C — продукт реакции. Будем полагать, что поглощение энергии светового излучения происходит колебательными уровнями молекул. В случае слоистой среды толщину поглощающего слоя обозначим l_a , а толщину прозрачного слоя — l_t . Тогда длина элемента периодической слоистой структуры $l = l_a + l_t$. Распространение светового импульса в i -м слое поглощающей среды в приосевой области гауссова пучка в предположении, что колебательные уровни неэквидистантны, а время V - V -релаксации много меньше длительности импульса и времени V - T -релаксации, описывается следующей системой безразмерных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} &= q\delta(E)(\sigma_C N + \sigma_A(1-N)) - (E - E_0(T)), \\ \varepsilon \frac{\partial T}{\partial t} &= T_E(E - E_0(T)) - \beta(T - T_0), \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= (1-N)\exp(-T_A/T) - kN\exp(-T_C/T) - D_N(N - N_0), \\ \frac{\partial q_0}{\partial z} + \delta_0 \delta(E)(\sigma_C N + \sigma_A(1-N))q_0 &= 0, \quad t > 0, \\ l(i-1) \leq z \leq l(i-1) + l_a, \\ T(z, t) &= T_0, \quad q_0(z, t) = q_0(l(i-1) + l_a, t), \\ l(i-1) + l_a < z \leq li, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} q &= \frac{q_0}{a_x a_y}, \quad \beta = \beta_0 \left(\frac{1}{a_x^2} + \frac{1}{a_y^2} \right), \\ a_r^2 &= a_{r0}^2 (z^2 + (1 + zF_r)^2), \quad r = x', y', \\ E_0(T) &= \exp(-1/T), \quad \delta(E) = E^n / (1 + E)^{n+2}. \end{aligned} \quad (2)$$

В прозрачных слоях температура среды постоянна, поглощение отсутствует, а радиусы пучка изменяются по тому же закону, что и в поглощающих слоях. Начальные условия для (1) имеют вид

$$\begin{aligned} q_0(0, t) &= q_0(t), \quad q_0|_{z=li} = q_0|_{z=l(i-1)+l_a}, \quad i = 1, \dots, N_l, \\ T|_{t=0} &= T_0, \quad E|_{t=0} = E_0(T_0), \quad q_0|_{t=0} = 0, \\ N|_{t=0} &= N_0 = 1 / \left(1 + k \exp(-(T_C - T_A)/T_0) \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Они соответствуют воздействию светового импульса формы $q_0(t)$ и равновесному состоянию среды до начала распространения лазерного излучения. В (1), (2) $E(z, t)$ — колебательная энергия единицы объема газа в данной моде; $E_0(T)$ — ее равновесное значение при данной поступательной температуре T ; $N \in [0, 1]$ — нормированная на максимальное значение концентрация продукта реакции; t — время, нормированное на характерное время V - T -релаксации; q — безразмерная интенсивность излучения в приосевой части пучка. Подчеркнем, что между активными слоями интенсивность светового излучения изменяется лишь из-за его дифракции. Параметр n — номер колебательного перехода, на котором осуществляется поглощение световой энергии. Разность населенностей уровней n и $n+1$ определяется функцией $\delta(E)$. Параметр T_E учитывает, в частности, долю поглощенной световой энергии, затрачиваемую на нагрев среды. Коэффициент β учитывает отток тепла в окружающую среду с температурой T_0 вследствие теплопроводности в поперечных к направлению распространения пучка направлениях; z — продольная координата, нормированная на выбранную длину; δ_0 — коэффициент поглощения световой энергии по интенсивности на длине нормировки; $q_0(z, t)$ характеризует максимальную интенсивность лазерного пучка. Функции a_x , a_y описывают изменение радиусов пучка по поперечным координатам x , y вдоль z с начальными значениями a_{r0} . Параметры T_A , T_C характеризуют энергии активации соответственно прямой и обратной химической реакции. Параметры σ_C , σ_A ($\sigma_A + \sigma_C = 1$, $\sigma_A > 0$, $\sigma_C > 0$) характеризуют сечения поглощения световой энергии молекулами продукта реакции и исходного вещества. Коэффициент D_N учитывает диффузию продукта реакции из области, занятой пучком. В данной работе считаем его равным нулю. E_r характеризуют фокусировку оптического излучения по соответствующим координатам.

В заключение этого раздела отметим, что система уравнений (1) адекватно описывает взаимодействие первоначально гауссова пучка с нелинейной средой, если профиль интенсивности оптического излучения в среде не становится трубчатым (т.е. пучок не имеет „провала“ интенсивности на его оси).

Различные сценарии перемещения доменов

Прежде всего отметим, что при обсуждении сценариев перемещения доменов высокого поглощения речь идет только о рассматриваемой в работе ситуации, когда не учитывается трансформация первоначально гауссова профиля пучка в пучок с трубчатым распределением интенсивности, которое в свою очередь из-за дифракции вновь становится подобным гауссову распределению. Как известно ([7,8] и другие работы данных авторов), в этом случае могут развиваться сложные процессы возникновения и исчезновения доменов высокого поглощения, обусловленные дифракцией оптического излучения.

При перемещении доменов из-за бездиффузионного механизма существенную роль играет уменьшение интенсивности излучения за формирующимися областями высокого поглощения. Оно проявляется двояко. Во-первых, из-за поглощения световой энергии имеет место самовоздействие домена: формируемая передняя по направлению распространения светового импульса часть домена изменяет условия формирования его задней части. Во-вторых, эти условия изменяются также в случае появления новых доменов, располагающихся ближе к входному сечению среды. Очевидно, самовоздействие домена присутствует всегда. При этом формирование домена у передней стенки сосуда или кристалла приводит к смещению задней стенки домена. В случае же его реализации в толще среды параметры взаимодействия оптического излучения со средой были таковы, что домен появлялся лишь в небольшой части среды. В обоих случаях его перемещение из-за самовоздействия было незначительным.

Для реализации движения домена на значительные расстояния необходимо, во-первых, различие в скорости формирования участков высокого поглощения, расположенных в различных сечениях среды. Это условие имеет место всегда. Во-вторых, необходимо, чтобы в пределах некоторой области по продольной координате существовали условия для переключения из нижнего в верхнее состояние системы среда–лазерное излучение и интенсивности падающего излучения было недостаточно для переключения системы в верхнее состояние во всей этой области. На практике данная ситуация появляется, например, при воздействии эллиптических пучков [9,10], для которых дополнительные домены появляются при значительно меньших интенсивностях по сравнению с соответствующим значением в случае абсорбционной оптической бистабильности и воздействия аксиально-симметричных пучков. Из-за зависимости скорости переключения системы из одного состояния в другое от интенсивности оптического излучения формирование домена вследствие эллиптичности профиля интенсивности во времени происходит позже. Поэтому его появление в области до домена, формируемого в области максимальной интенсивности,

изменит условия формирования последнего и он начнет двигаться навстречу направлению распространения оптического излучения в отсутствие продольной диффузии. Если же оптическое излучение приобретает эллиптичность профиля его интенсивности после прохождения слоя, в котором формируется домен при воздействии аксиально-симметричного пучка, то движение домена, появляющегося в среде из-за эллиптичности происходит вследствие изменения интенсивности светового излучения, обусловленного формированием первого домена. Такое движение происходит вдоль направления распространения оптического излучения.

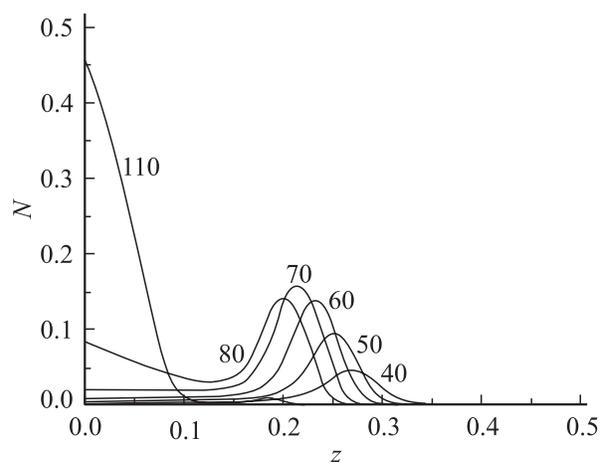


Рис. 1. Движение домена концентрации продукта реакции в сплошной среде для значений параметров $a_{x0} = 0.07$, $a_{y0} = 3.271$, $F_y = 0$, $F_x = -2.5$, $\beta_0 = 0.0006$, $\delta_0 = 185$. Цифры у кривых — безразмерный момент времени.

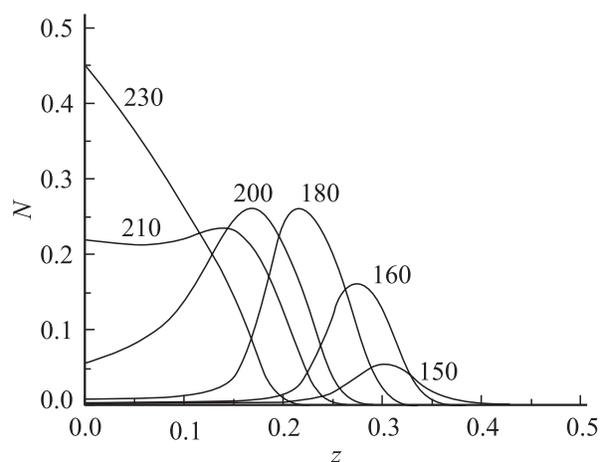


Рис. 2. Движение домена в сплошной среде (движущийся домен сливается с другим доменом) для значений параметров $q_0 = 0.095$, $a_{x0} = 0.07$, $a_{y0} = 3.271$, $F_y = 0$, $F_x = -2.5$, $\beta_0 = 0.0006$, $\delta_0 = 100$. Цифры у кривых — безразмерный момент времени.

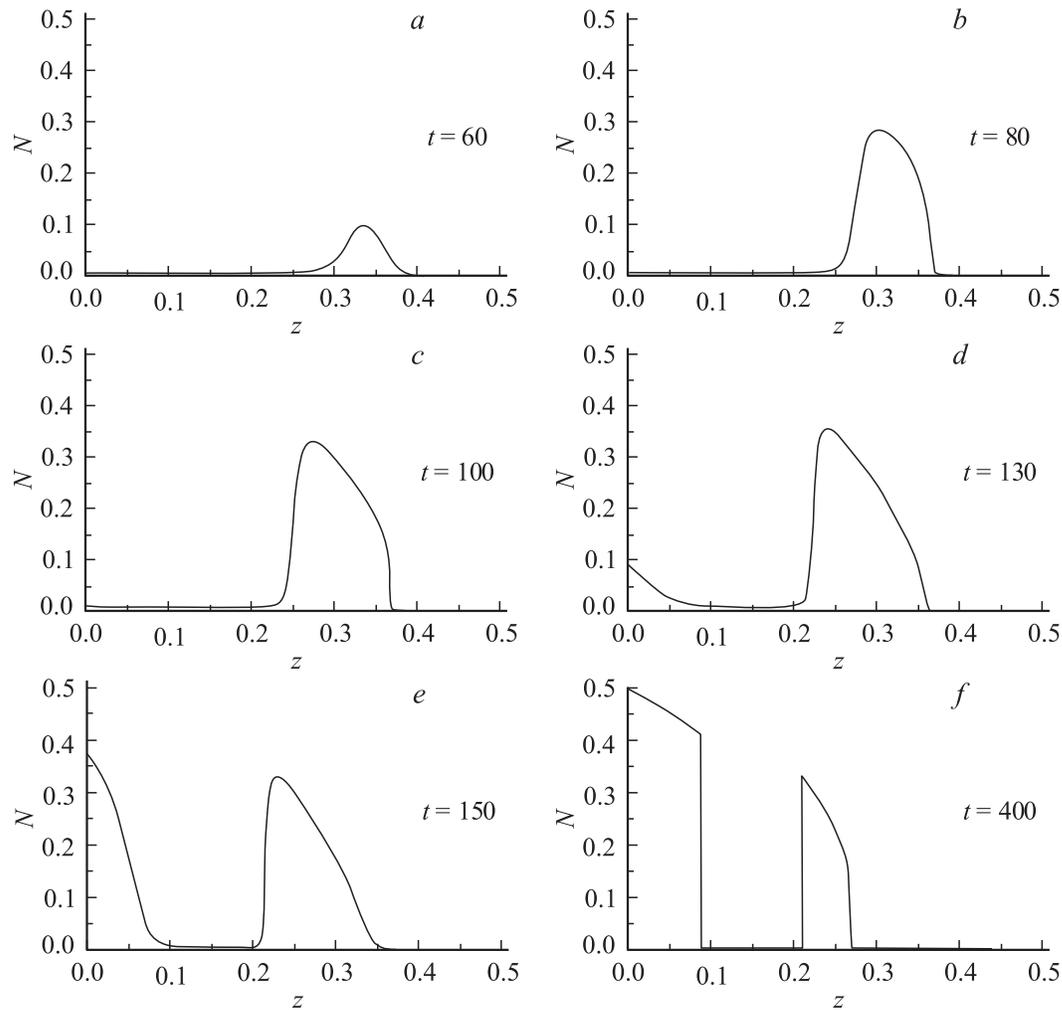


Рис. 3. Движение домена в сплошной среде (движущийся домен останавливается) для значений параметров $q_0 = 0.085$, $a_{x,0} = 0.07$, $a_{y,0} = 3.271$, $F_y = 0$, $F_x = -2.2$, $\beta_0 = 0.0006$, $\delta_0 = 50$.

Компьютерные эксперименты

Различные сценарии возникновения движения доменов проиллюстрируем рисунками, для которых следующие значения параметров являются неизменными: $T_0 = 0.125$, $T_E = 5$, $\varepsilon = 1$, $T_A = 1$, $T_C = 0.1$, $k = 0.5$, $\sigma_A = 1$, $\sigma_C = 0$.

Отметим, что в предположении быстрой $V-T$ -релаксации (т.е. при учете лишь изменения поступательной температуры и изменения концентраций химических веществ) оптическая бистабильность отсутствует для данных T_0 , T_A , T_C , k , σ_A , σ_C . Следовательно, она реализуется только за счет нелинейности поглощения на колебательных переходах.

На рис. 1 показано, что сначала за счет высокой интенсивности сфокусированного в толщу среды пучка формируется домен высокой концентрации в области перетяжки ($t = 40, 50$). По мере роста концентрации продукта реакции на переднем фронте домена (и до него) он несколько смещается ($t = 60, 70$). Затем начинается формирование домена за счет эллиптичности

профиля излучения вдали от области перетяжки в сужающейся части пучка ($t = 80$). В результате первый по времени появления домен исчезает ($t = 110$). Таким образом, рис. 1 иллюстрирует движение домена вдоль оси z , так как его формирование началось в окрестности точки $z = 0.28$, исчез он в окрестности точки $z = 0.18$, а окончательно сформировался в области $z \leq 0.1$. Причем при перемещении различаются два этапа: в области $40 \leq t \leq 70$ домен движется в то время, как формирование другого домена еще незаметно, но в области $z \leq 0.2$ однородно растет концентрация продукта реакции. Причиной данной эволюции домена является влияние формирования его переднего фронта на уже сформировавшиеся части. При этом уменьшение интенсивности в области перетяжки за счет поглощения части световой энергии средой, расположенной до домена, играет вспомогательную роль, увеличивая скорость исчезновения тыловой части домена. При $t = 80, 110$ домен перемещается и исчезает во время формирования второго домена из-за эллиптичности пучка.

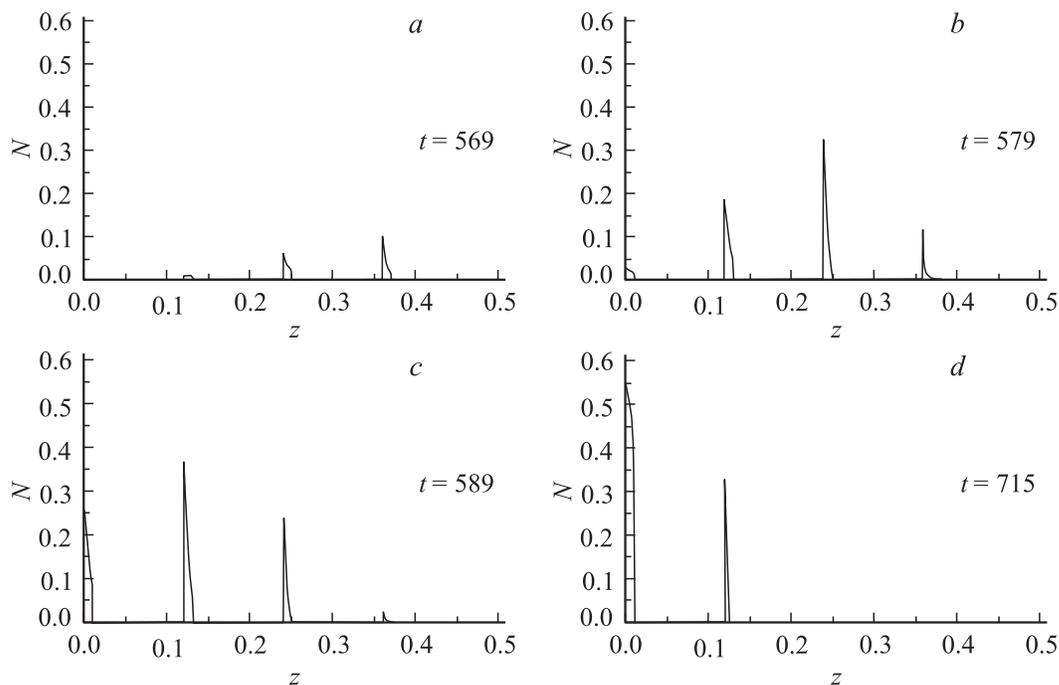


Рис. 4. Движение домена в слоистой среде для значений параметров $q_0 = 0.15$, $a_{x0} = 0.07$, $a_{y0} = 3.271$, $F_y = 0$, $F_x = -2.2$, $\beta_0 = 0.0006$, $\delta_0 = 1500$, $l_a = 0.01$, $l_t = 0.11$.

Первый этап позволяет сформулировать следующий механизм движения. В процессе формирования переднего фронта интенсивность в уже сформировавшихся частях домена уменьшается и они исчезают. Формирование же переднего фронта происходит в более поздний момент времени, так как интенсивность излучения здесь меньше, чем в перетяжке. В результате домен перемещается в направлении, противоположном направлению распространения излучения, но без влияния продольной диффузии характеристик среды. Отметим также, что на первом этапе формирование второго домена визуально почти незаметно, но фактически оно происходит и также оказывает свое влияние.

При других соотношениях параметров взаимодействия первый из сформировавшихся доменов может также слиться с последующим доменом (рис. 2) или остановиться (рис. 3), перемещаясь на значительные расстояния. На рис. 3, *e, f* можно видеть, как исчезает тыловая часть домена в области перетяжки в результате формирования домена вблизи границы среды. При этом передний фронт домена в области перетяжки практически не изменяется.

Для практики представляет интерес влияние рассмотренного механизма движения доменов на запись информации в объемных слоистых носителях. Для примера рассмотрим параметры взаимодействия, аналогичные рис. 2, 3, но при воздействии оптического излучения на слоистую среду (рис. 4). На рис. 4 можно видеть, что первый из сформировавшихся доменов осуществил ложную запись в три слоя. По окончательной картине

(рис. 4, *d*) в данном случае трудно определить, остался ли аналогично рис. 2 один домен, разделенный прозрачной средой, или произошла остановка домена аналогично рис. 3. Однако запись в двух слоях здесь хорошо видна. Если при этом имела бы место необратимая реакция, то запись информации произошла бы в 4 слоя.

Для подтверждения обсуждавшегося выше сценария движения доменов и его реализации при воздействии аксиально-симметричных лазерных пучков представлен на рис. 5, *a*. Возможно также и формирование динамической двухдоменной структуры в результате уменьшения интенсивности лазерного пучка за счет поглощения энергии излучения (рис. 5, *b*). На рис. 5, *b* при $t = 50$ есть два максимума: один — в начале, другой — в толще среды. Однако при воздействии аксиально-симметричных пучков для реализации движения домена необходимо, чтобы условия переключения системы в верхнее состояние имели место на большей части среды и коэффициент поглощения среды был бы большим. Очевидно, что эти два условия связаны друг с другом и означают, что продольный размер домена много меньше области среды, в которой в случае слабого поглощения он может реализоваться.

Заключение и обсуждение результатов

Изложенные выше результаты демонстрируют наряду с уже известными механизмами движения доменов высокого поглощения, обусловленными влиянием продольной диффузией характеристик среды или дифрак-

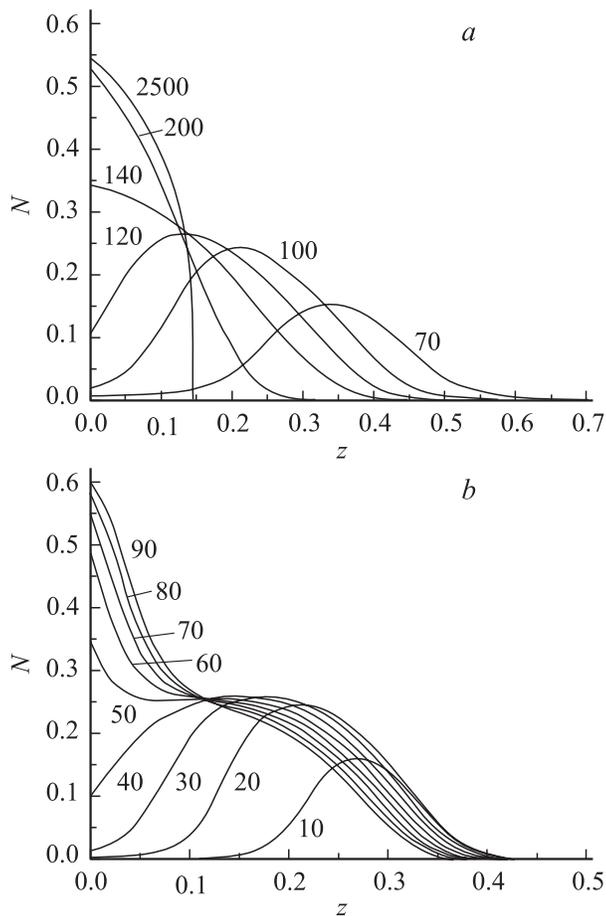


Рис. 5. *a* — движение домена при воздействии аксиально-симметричного пучка. Значения параметров: $q_0 = 0.01$, $a_{x,0} = a_{y,0} = 0.2$, $F_x = F_y = -1$, $\beta_0 = 0.001$, $\delta_0 = 150$. Рядом с кривыми указаны соответствующие моменты времени. *b* — динамическая двухдоменная структура при воздействии аксиально-симметричного пучка. Значения параметров: $q_0 = 0.1$, $a_x = a_y = 0.5$, $F_x = F_y = -2.5$, $\beta_0 = 0.0006$, $\delta_0 = 500$. Цифры у кривых — безразмерный момент времени.

цией пучка, новый бездиффузионный механизм. Его реализация связана с различной скоростью формирования разных частей домена, что всегда имеет место в абсорбционных оптически бистабильных системах, и при условии возможности реализации домена в области среды, длина которой превышает продольный размер домена, формируемый в случае воздействия аксиально-симметричных пучков. На практике данная ситуация наиболее вероятна при воздействии эллиптических пучков в системах трехмерной оптической памяти. Именно в этом случае появляется возможность формирования дополнительных доменов из-за эллиптичности профиля как до перетяжки пучка, так и после нее, которые могут удовлетворять сформулированному выше условию реализации движения области высокого поглощения. Однако к подобному же действию может приводить зависимость времени V - T -релаксации поглощенной световой энергии от колебательной энергии

молекул. Важно также подчеркнуть, что это движение будет осуществляться за существенно более короткий интервал времени по сравнению с рассмотренным выше случаем, так как изменение поступательной температуры из-за теплопроводности происходит за время, во много раз превышающее характерное время изменения колебательной энергии.

Аналогичные зависимости могут иметь место и в запиывающих устройствах на основе полупроводников при учете изменения времени релаксации свободных носителей заряда от ее концентрации. Поэтому полученные выше результаты применимы для широкого круга практических задач.

Список литературы

- [1] Nonlinear Optics Phenomena and Coherent Optics in Information Technologies. / Ed. S.S. Chesnokov, V.P. Kandidov, N.I. Koroteev. Proc. SPIE. 1999. Vol. 3733.
- [2] *Rentzepis P.M.* US Patent. N 5.268.862. 1993.
- [3] *Dvornikov A.S., Cokgor I., Mc Cormic et al.* // Opt. Commun. 1996. Vol. 128. P. 205–210.
- [4] *Гиббс Х.М.* Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 518 с.
- [5] *Розанов Н.Н.* Оптическая бистабильность и гистерезис в распределенных нелинейных системах. М.: Наука, 1997. 334 с.
- [6] *Бункин Р.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С.* // Изв. АН СССР. 1982. Т. 46. № 6. С. 1150–1169.
- [7] *Выслоух А.В., Трофимов В.А.* // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 3. С. 60.
- [8] *Выслоух А.В., Трофимов В.А.* // Опт. и спектр. 2000. Т. 89. № 5. С. 802–805.
- [9] *Трофимов В.А., Трощев Ю.В., Гуназе О.А.* // Химическая физика. 2000. Т. 19. № 7. С. 14–18.
- [10] *Трофимов В.А., Трощев Ю.В.* // Опт. и спектр. 2001. Т. 91. № 2. С. 283–289.
- [11] *Трофимов В.А., Трощев Ю.В.* // Опт. и спектр. 2002. Т. 92. № 2. С. 315–319.