

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА НАНОЧАСТИЦ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ЛАЗЕРНОМ ПУЧКЕ

С.Р.Нерсисян, Н.В.Табириян

Институт прикладных проблем физики НАН Армении  
375014 Ереван, Армения

Поступила в редакцию 12 августа 1998 г.

Обнаружена пространственно-временная динамика наночастиц магнитной жидкости, индуцированная лазерным излучением. Осуществлена визуализация и проведено измерение перераспределения частиц, показывающие сильное уменьшение концентрации частиц на оси лазерного пучка и вокруг ее периферии. Приводится ряд доказательств, показывающих, что в определении динамики перераспределения частиц ключевую роль играет термодиффузия наночастиц. Полученные в процессе высокого качества картины самомодуляции лазерного пучка служат новым мощным методом для исследования явлений переноса и нелинейного взаимодействия света с коллоидами.

PACS: 66.10.Cb, 75.50.Mm, 78.20.Ci, 82.70.Dd

В некоторых ранних работах обсуждались интересные эффекты при взаимодействии лазерного излучения с поглощающими растворами и коллоидами. Среди систем, представляющих широкий фундаментальный и прикладной интерес для науки и технологии, можно отметить примеси фуллерена [1], органических красителей [2, 3], полимеров [4, 5] и наночастицы аэрозоля [6] в жидких кристаллах, и коллоиды магнитных частиц [7–9].

В настоящей работе сообщается о полученных результатах пространственно-временной динамики перераспределения наночастиц магнитной жидкости (МЖ), индуцированной лазерным излучением. Это явление может оказаться универсальным для поглощающих смесей, обеспечивающих внутреннюю обратную связь, которая определяет профиль концентрации и температуры коллоида в лазерном пучке.

Сущность эксперимента очень проста и заключается в следующем. Сфокусированное лазерное излучение падает нормально на тонкий слой МЖ толщиной  $L = 50$  мкм. Выходное излучение регистрируется и исследуется на дальней зоне. Использован одномодовый He-Ne-лазер с максимальной мощностью до 40 мВт, на длине волны  $\lambda = 632.8$  нм. Радиус пучка  $w = 0.6$  мм ( $HWe^{-2}M$ ). Ячейка МЖ представляет собой коллоидную смесь порошка магнетита ( $Fe_3O_4$ ) в керосине, объемная доля которого составляет 6%, а средний размер частиц порядка 10 нм. Коэффициент поглощения  $\sigma_0$ , измеренный нами для низких мощностей излучения  $P \sim 10$  мкВт, оказался равным  $\sigma_0 = 550$  см $^{-1}$ .

С увеличением мощности падающего излучения на дальней зоне образовывалась система концентрических колец. Параметры этой картины – число колец и их расходимость – достаточно точно характеризуют изменение показателя преломления, индуцированное лазерным излучением, а следовательно, светоиндуцированные модуляции материальных параметров среды. Этот метод успешно применяется уже много лет в исследованиях взаимодействия лазерного излучения с различными нелинейными средами [10, 11].

Отметим своеобразную динамику образования колец, наблюдаемую в нашем эксперименте, при внезапном включении лазерного излучения. А именно, при фиксированной мощности падающего излучения параметры кольцевой структуры (число колец и их расходимость) на дальней зоне сначала достигают некоторого максимального значения, после чего структура сокращается в более малую расходимость и малое число колец. Подобное комплексное поведение было обнаружено в жидких кристаллах при весьма определенных геометрических условиях их взаимодействия с лазерным излучением [11–13], что является следствием нелинейного распространения эллиптически поляризованного света в высокоанизотропной и сильно неоднородной среде.

Важно отметить, что здесь мы имеем дело с комплексным поведением в изотропной и однородной среде, как МЖ, взаимодействующей с линейно поляризованным световым пучком. Следовательно, возникает и вопрос о механизме модуляции показателя преломления среды, обуславливающим вышеуказанный сценарий динамики кольцевой структуры в МЖ.

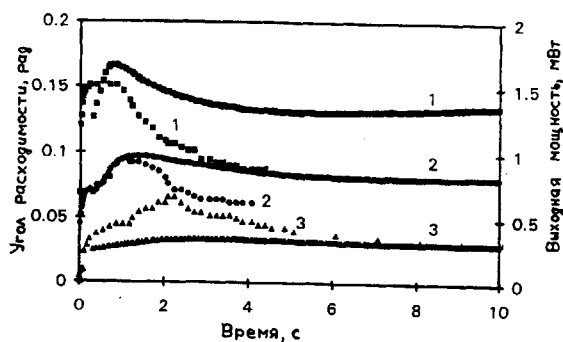


Рис.1. Динамика расходимости (слева) и полной мощности (справа) выходного пучка для разных значений мощности падающего пучка: 1 – 22.5 мВт; 2 – 12 мВт; 3 – 4.2 мВт

Ответы на эти проблемы можно найти в основных особенностях явления, выявленных в ходе эксперимента. На рис.1 представлена динамика угла расходимости и полной мощности выходного пучка при внезапном включении лазерного излучения. Видно, что обе эти величины при фиксированных уровнях мощности падающего пучка сначала увеличиваются, а потом уменьшаются во времени. Изменения в пропускании и расходимости становятся более сильными с увеличением мощности падающего излучения. При этом проверено, что однородное нагревание ячейки МЖ не приводит к каким-либо существенным эффектам.

Полученные особенности можно интерпретировать, если принимать во внимание, что мы имеем дело с термодиффузией (сорэ-эффект), индуцированной сильным, пространственно локализованным нагревом слоя МЖ в лазерном пучке. А именно, утечка поглощающих наночастиц из центральной части пучка (из района с высокими температурными градиентами) в сторону более холодных краев, по-видимому, является единственной причиной нелинейного поглощения – увеличение прозрачности материала с увеличением мощности излучения. Увеличение же прозрачности приводит к уменьшению поглощения, что в свою очередь приводит к уменьшению температурных градиентов. Следовательно, частицы плывут обратно в центральную часть пучка и поглощение снова возрастает. В пользу описанного выше сценария эффекта нами был проведен ряд экспериментальных и теоретических доказательств.

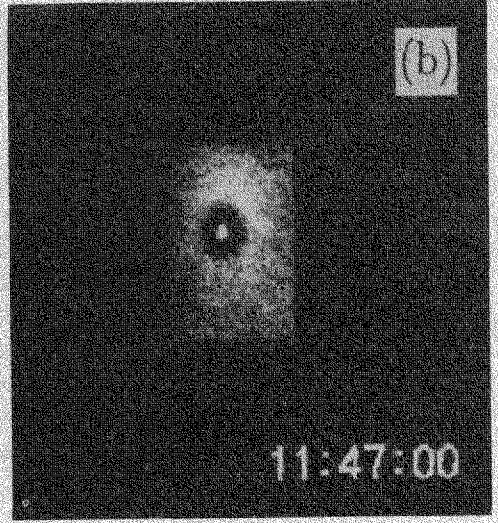
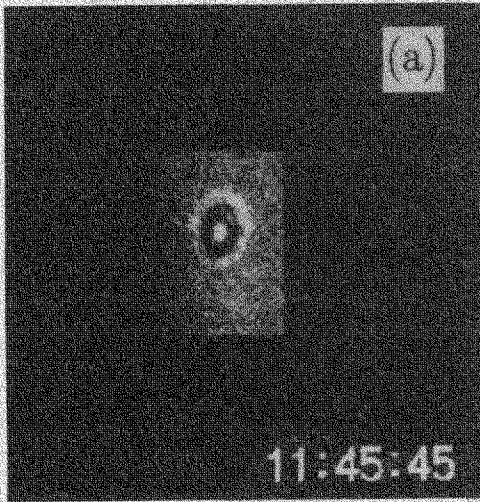


Рис.2. Картина области слоя МЖ, освещенной фокусированным лазерным пучком, которая видна под микроскопом: а) картина была снята в момент достижения пика пропускания; б) картина после стабилизации устойчивого состояния пропускания

Пятно слоя МЖ, которое освещалось лазерным пучком, непосредственно было визуализировано под оптическим микроскопом. На рис.2 представлены картины, полученные в момент достижения максимума пропускания слоя МЖ и в момент, когда устанавливается более низкий уровень пропускания. Как видно из рис.2а, в момент достижения пика пропускания возникают две области с высокой прозрачностью на участке слоя МЖ. Одну из них – на оси пучка – можно приписать к термодиффузии поглощающих частиц из входной, более горячей границы в сторону выходной, более холодной границы ячейки МЖ. Можно показать, что такое перераспределение поглощающих частиц увеличивает прозрачность ячейки МЖ.

Происхождение другой – круговой области с высокой прозрачностью (рис.2а) связано с поперечным градиентом температуры, который для гауссовского пучка интенсивности  $I = I_0 \exp(-r^2/w^2)$  достигает максимума на расстоянии  $r = w/2^{1/2}$  от оси пучка.

На рис.2б представлена картина слоя МЖ после стабилизации более низкого уровня пропускания, демонстрирующая частичное возвращение частиц во внутрь пучка.

Теоретическое описание явления основывается на решении систем уравнений диффузии и теплопроводности с учетом зависимости коэффициента поглощения от концентрации поглощающих частиц:

$$\partial c / \partial t = D \Delta c + D_T c (1 - c) \Delta T, \quad (1a)$$

$$\partial T / \partial t - \chi \Delta T = \sigma I / \rho c_p, \quad (1b)$$

В (1) постоянная  $D$  (см<sup>2</sup>/с) характеризует обычную диффузию; параметр  $D_T$  (см<sup>2</sup>/с) является коэффициентом термодиффузии; величина  $c$  – концентрация поглощающих частиц в среде;  $\chi$  (см<sup>2</sup>/с) – коэффициент теплопроводности;  $\rho c_p$  (дж/см<sup>3</sup>·К) – удельная теплоемкость материала;  $\sigma$  (см<sup>-1</sup>) – коэффициент поглощения;  $I$  (Вт/см<sup>2</sup>) – ин-

тенсивность лазерного излучения; величина  $\alpha$  определяет коэффициент поглощения магнетита.

Качественный анализ этой системы уравнений указывает на возможность вышеописанной комплексной нелинейной динамики и определяет условие ее возникновения, которое связывает интенсивность излучения с коэффициентом поглощения, радиусом пучка и толщиной ячейки. В случае малого поглощения:  $\sigma L \ll 1$ ,  $\sigma w \ll 1$ , это условие имеет сравнительно простой вид:

$$\sigma_0 I \geq \frac{\rho c_p \chi^2}{4D_T} \left( \frac{1}{w^2} + \frac{1}{L^2} \right). \quad (2)$$

Согласно (2), существует пороговая интенсивность, когда характер перераспределения частиц становится комплексным, что и было обнаружено в экспериментах. Более того, согласно (2), при данной фиксированной мощности излучения существует критическая толщина ячейки, выше которой динамика процесса становится комплексной:

$$L \geq L_c = w / \sqrt{(4D_T \sigma_0 P / \pi \rho c_p \chi^2) - 1}. \quad (3)$$

Это предсказание нами было проверено в экспериментах со слоями МЖ разной толщины. При этом варьировался также радиус перетяжки пучка. На рис.3а приведена экспериментально полученная зависимость критической толщины  $L_c$  от диаметра пучка  $2w$  при фиксированной мощности падающего пучка  $P = 8.5$  мВт. Эта зависимость оказалась линейной в соответствии с теоретическим предсказанием.

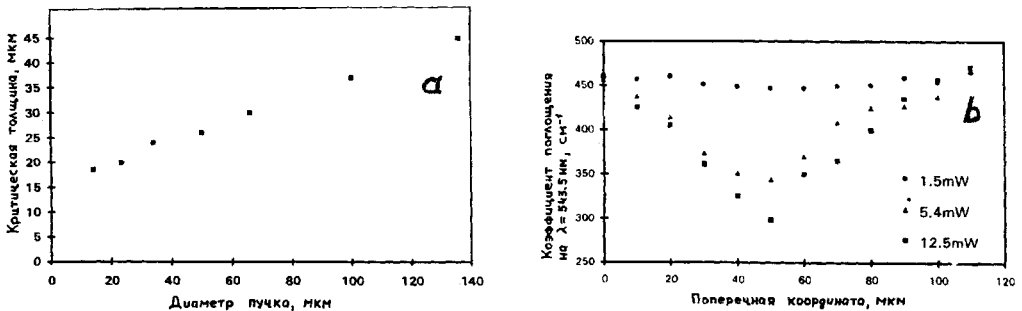


Рис.3. а) Экспериментально полученная зависимость критической толщины  $L_c$  от диаметра пучка; б) Профиль коэффициента поглощения в устойчивом состоянии, измеренный сканированием слабого пробного пучка поперек пятна сильного пучка накачки

Выражение (3) позволяет определить константу термодиффузии МЖ, измерив наклон кривой  $L_c$  от  $w$  (см. рис.3а). Принимая для материальных параметров МЖ типичные значения для жидкостей:  $\rho c_p \sim 1$  Дж/см<sup>3</sup>·К,  $\chi \sim 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с, а также имея в виду экспериментальные значения для  $\sigma_0$  ( $\sigma_0 = 550$  см<sup>-1</sup>) и ( $P = 8.5$  мВт), получим  $D_T \sim 10^{-7}$  см<sup>2</sup>·с/К. Этот результат является весьма разумным при сравнении с типичными значениями константы термодиффузии для подобных коллоидов. Однако уместно отметить, что уравнения (2) и (3) имеют только качественное значение в обсуждаемом нами процессе.

Ключевым экспериментом, доказывающим нашу главную гипотезу о лазерно-индуцированном перераспределении поглощающих частиц, заключался в измерении пространственно-локализованного пропускания слоя МЖ. Для этого было проведено

сканирование слабого ( $\sim 10$  мкВт) и узкого ( $w \sim 20$  мкм) пробного пучка зеленого He-Ne-лазера ( $\lambda = 543.5$  нм) поперек области, где МЖ освещался пучком накачки сильного красного ( $\lambda = 632.8$  нм) лазера. Зеленый лазерный пучок был выбран для легкости юстировки и уменьшения шума, обусловленного отражением и рассеянием сильного красного пучка. Оба пучка сфокусированы линзой на ячейку с МЖ. Измерения проводились в стационарном состоянии, то есть после стабилизации переходного процесса. При этом зеленый пучок предварительно уширялся с целью получения более узкого размера фокальной перетяжки. Под микроскопом было проверено и установлено, что диаметр красного пучка составляет 90 мкм, в то время как диаметр зеленого пучка равнялся 20 мкм. Положение пробного пучка в процессе сканирования поперек пучка накачки контролировалось под микроскопом. Полученный таким образом профиль коэффициента поглощения в стационарном состоянии приведен на рис.3б для некоторых значений мощности пучка накачки. Видно, что кривая достаточно гладкая для низких мощностей, а для более высоких мощностей коэффициент поглощения в центральной области пучка накачки резко уменьшается.

Интересно заметить, что концентрация частиц на оси пучка может уменьшаться более чем в два раза, что обусловлено сорэ-эффектом. Увеличение температуры в эксперименте достигало  $30^\circ$ . Следовательно, основной вклад в изменение показателя преломления дает модуляция концентрации ( $\partial n / \partial c \sim 1$ ), нежели модуляция температуры ( $\partial n / \partial T \sim 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ). Это обстоятельство не является столь очевидным для такой сильно поглощающей среды.

Таким образом, в настоящей работе сообщалось о прямом обнаружении и исследовании динамики пространственно-временного перераспределения наночастиц, индуцированной лазерным пучком в МЖ. Обнаружена обратная связь, обуславливающая комплексную динамику взаимодействия света с сильно поглощающей коллоидной жидкостью из-за сорэ-эффекта. Полученные результаты позволяют оценить константу термодиффузии для МЖ. В дальнейшем мы сконцентрируем наше внимание на новых возможностях, которые может дать для фундаментальных исследований и их приложений в оптической технологии взаимодействие света с коллоидными жидкостями, содержащими в себе поглощающие наночастицы.

- 
1. I.C.Khoo, *Opt. Lett.* **20**, 2137 (1995).
  2. Janossy, *Phys. Rev.* **E49**, 2957 (1994).
  3. D.Voloshchenko et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, 566 (1995).
  4. G.Goleme et al., *Opt. Lett.* **22**, 1226 (1997).
  5. S.R.Sutherland et al., *Appl. Phys. Lett.* **64**, 1074 (1994).
  6. M.Kreuzer et al., *Appl. Phys. Lett.* **62** 1712 (1993).
  7. T.Du, S.Yuan, and W.Luo, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 1844 (1994).
  8. T.Du and W.Luo, *Mod. Phys. Lett.* **B9**, 1643 (1995).
  9. J.C.Bacri et al., *Phys. Rev. Lett.* **74**, 5032 (1995).
  10. F.B.Dabby et al., *Appl. Phys. Lett.* **16**, 362 (1970).
  11. N.V.Tabiryany, B.Ya.Zel'dovich, and A.V.Sukhov, *The orientational optical nonlinearity of liquid crystals* (Special Issue of *Mol. Cryst. Liquid Cryst.*, **136**, №1, 1986).
  12. V.Carbonate et al., *Phys. Rev.* **E47**, 3741 (1993).
  13. E.Santamato et al., *Phys. Rev. Lett.* **64**, 1377 (1990).