

Ограничение интенсивности лазерного излучения с помощью бинарных расслаивающихся растворов

А.Ю.Герасименко, В.М.Подгаецкий

Исследована возможность ограничения интенсивности лазерного излучения с использованием светоиндуцированного критического рассеяния при оптотермодинамическом переводе расслаивающихся растворов триэтиламин–вода и 2-бутоксиэтанол–вода в лабильную область термодинамического состояния растворов. Для раствора триэтиламин–вода получено уменьшение интенсивности излучения неодимового лазера ($\lambda = 1.06$ мкм) в ~ 10 раз. Сопоставлены временные зависимости интенсивности падающего излучения и излучения, прошедшего через слои растворов.

Ключевые слова: ограничение интенсивности, лазерное излучение, расслаивающийся раствор, критическое состояние.

1. Введение

Интенсивное развитие лазерной техники и ее широкое внедрение в различные сферы человеческой деятельности вызывает необходимость поиска новых средств защиты от светового поражения органов зрения и сенсоров оптического излучения. В обычных устройствах для ослабления солнечного излучения и засветки сварочных аппаратов используются стеклянные либо пластмассовые цветные светофильтры. При этом существует возможность сравнительно медленного ослабления излучения с учетом характерного времени инерции человеческого зрения (~ 0.1 с) [1].

В сфере применения мощных лазеров рост интенсивности их излучения стимулировал развитие нового направления оптической техники – ограничения (лимитирования) энергии и мощности лазерного излучения (ЛИ). Проблема ограничения интенсивности импульсного ЛИ, начиная с пионерских работ [2, 3], привлекает большое внимание исследователей, что нашло отражение в статьях [4–7]. Особенность применяемого динамического ослабления излучения импульсных лазеров заключается в светоиндуцированном изменении (за десятки наносекунд) поглощающих, рассеивающих либо пространственных свойств нелинейного оптического вещества ограничителя интенсивности ЛИ (ОИЛИ).

Несмотря на имеющуюся обширную информацию о конструкции и нелинейных оптических средах ОИЛИ с различными механизмами ограничения интенсивности света, пока еще остается нерешенной задача уменьшения интенсивности ЛИ до уровня, удовлетворяющего практическим требованиям. Помимо этого большие затруднения вызывает необходимость избегать искажений цветового восприятия операторов оптических приборов либо значительно сужать области чувствительности сенсоров,

что связано с селективностью ОИЛИ. Для решения этих спектральных проблем представляется перспективным использование практически неселективных механизмов ограничения интенсивности излучения, к которым можно отнести светоиндуцированное термическое рассеяние и фокусировку/дефокусировку ЛИ с его диафрагмированием.

Ввиду того, что действие термического рассеяния, обычно реализуемого в однокомпонентных жидкостях, связано с локальным вскипанием и образованием сильно рассеивающих пузырьков пара, время срабатывания соответствующих ОИЛИ сравнительно велико, так что здесь может идти речь об ограничении интенсивности не слишком коротких лазерных импульсов. Кроме того, термическое рассеяние реально осуществимо лишь при значительном энерговыделении в жидкость. Использование фокусировки/дефокусировки ЛИ на практике ограничено возможностью возникновения оптического пробоя в схеме ОИЛИ, представляющего опасность для защищаемого органа зрения или оптического устройства.

Особое место занимает задача ослабления сравнительно маломощного непрерывного ЛИ, которое создается лазерными указками. Это вызывает интерес к поиску новых средств ослабления ЛИ со средней интенсивностью [8]. По этим причинам актуален поиск новых неселективных механизмов ограничения интенсивности ЛИ, к которым можно отнести светоиндуцированное рассеяние излучения в расслаивающихся растворах (РР) [9–11].

Выяснению особенностей применения светоиндуцированного рассеяния в РР вблизи критической точки расслаивания (КТР) для ограничения интенсивности ЛИ посвящено настоящее исследование. Удовлетворить жестким требованиям, предъявляемым к экспериментальной реализации методики (созданию компактного и пригодного к различным условиям эксплуатации прибора), можно с помощью оптотермодинамического метода перевода в лабильное состояние РР через КТР под действием ЛИ. Его суть заключается в возможности изменения термодинамического состояния жидкости при нерезонансном взаимодействии с ней мощного оптического излучения. Привлекательность этого метода состоит в возможности широкого варьирования интенсивности и длительности импульса. В этом случае поглощение рабочей средой ог-

А.Ю.Герасименко, В.М.Подгаецкий. Национальный исследовательский университет МИЭТ, Россия, 124498 Москва, Зеленоград, проезд 4806, 5; e-mail: podgaetsky@yandex.ru

Поступила в редакцию 5 августа 2011 г., после доработки – 17 апреля 2012 г.

раничителя даже сравнительно маломощного ЛИ может приводить к значительному изменению термодинамического состояния среды [12].

2. Оптотермодинамический перевод расслаивающегося раствора в лабильное состояние

Ранняя стадия светоиндуцированного рассеяния в бинарном жидком РР метанол–циклогексан впервые наблюдалась в [13] по характеру рассеянного излучения He–Ne-лазера. Обратное рассеяние оптического излучения на температурной аномалии в РР исследовалось в [14–16], где отмечено значительное влияние флуктуаций анизотропии на происходящие процессы. В работе [17] описан оптотермодинамический метод измерения положения спинодали в РР с нижней КТР. Кинетика пространственной структуры жидких РР в условиях замедленной конвекции в них исследовалась в [18]. Всесторонний анализ возможностей использования лазерных методов в исследованиях светоиндуцированного рассеяния был проведен в работах [19–21], где также было указано на эффективность светоиндуцированной бародиффузии в рассматриваемых процессах.

В системе бинарного РР, где бинодаль и спинодаль имеют единственную общую КТР, преждевременное разделение системы на две фазы в результате гетерогенной нуклеации препятствует возможности существования раствора в фазовом состоянии, находящемся в закритической лабильной области между бинодалью и спинодалью. Достигнуть окрестности спинодали можно только с использованием неравновесных оптотермодинамических процессов, которые, в частности, могут инициироваться поглощением лазерных импульсов малой длительности в РР [22, 23].

Среди бинарных РР с нижней КТР практический интерес для рассматриваемых целей представляют водные растворы триэтиламина (ТЭА) с нижней КТР и 2-бутоксиэтанола (БОЭ) (бутилцеллозоля), у которого имеется как нижняя, так и верхняя КТР. Для РР ТЭА–вода критическая температура расслаивания $T_{cr} = 291.32$ К, а критическая концентрация $C_{cr} = 32.12$ мас. %. Для РР БОЭ–вода с нижней КТР имеем $T_{cr} = 321.44$ К и $C_{cr} = 30.14$ мас. % [24–27].

При оптотермодинамическом воздействии на фазовое состояние РР с нижней КТР в случае поглощения света первоначально гомогенный раствор переходит в метастабильную область. Поглощение ЛИ в РР вызывает образование и рост новой фазы в лабильной области, который сопровождается возникновением неоднородностей показателя преломления и интенсивным рассеянием излучения (светоиндуцированной критической опалесценцией [28]). Эти явления сопровождаются светоиндуцированным спиноподальным распадом в жидкости, который наблюдался в [10] при засветке импульсной ксеноновой лампой раствора БОЭ–вода с критической концентрацией.

При экспериментальных исследованиях процесса ограничения интенсивности ЛИ в критических РР с использованием светоиндуцированной критической опалесценции следует иметь в виду, что увеличение отклонения температуры от критической снижает степень развития флуктуаций в системе. Это приводит к уменьшению влияния на процесс светоиндуцированного спиноподального распада

«затравочной» структуры, представляющей собой неравновесные гетерофазные центры, и тем самым к снижению эффективности ограничения интенсивности ЛИ. В свою очередь, увеличение глубины внедрения в область неустойчивости, определяемое конечной температурой системы, которая зависит от плотности энергии и длительности импульса падающего ЛИ, позволяет получать состояния с высокой степенью лабильности, увеличивая эффективность ограничения интенсивности ЛИ.

3. Методика исследования

Исследованные соединения ТЭА и БОЭ со степенью чистоты не менее 97% осушались щелочью, после чего обрабатывались активированным углем и подвергались вакуумной перегонке. В результате степень их чистоты, определенная хроматографическим методом, была не хуже 99.5%. Такая тщательная очистка позволяет избежать сдвига температуры фазового расслаивания вследствие влияния химических примесей. Измерение массовой концентрации органических компонентов растворов с дистиллированной водой проводилось с точностью ~ 1 мас. %.

Поскольку ограничение интенсивности мощного ЛИ с помощью РР связано с выводом последних из первоначального термодинамического равновесия и внедрением их в область лабильности при температуре, как можно более близкой к КТР, должна происходить тщательная термостабилизация растворов. Толщина слоя раствора, взаимодействующего с излучением, составляла 3 мм.

Кювета помещалась в массивную камеру из нержавеющей стали, заполненную теплоносителем (циркулирующей дистиллированной деионизованной водой) и подключенную к термостату с помощью шлангов. Термостабилизация теплоносителя осуществлялась с точностью ± 0.1 К.

Поскольку воздействие лазерного излучения приводит к выводу системы из первоначального термодинамического равновесия, то повторное проведение исследования требует интенсивного перемешивания жидкости для ее возвращения в исходное состояние. Для ускорения этого процесса в раствор вводился небольшой пузырек воздуха. Это, помимо демпфирования давления в жидкости, возникающего в момент облучения раствора, способствовало последующему более интенсивному его перемешиванию. Перемешивание жидкости при дополнительном механическом взбалтывании кюветы проводилось после каждого эксперимента в течение 10–15 мин для устранения градиентов температуры и концентрации раствора. Эта методика позволяет восстановить в системе термодинамическое равновесие в течение двух-трех часов после установления кюветы в камеру [12].

Для исследования особенностей применения светоиндуцированного рассеяния в РР вблизи КТР использовался экспериментальный стенд, одним из элементов которого являлся лазер на неодимовом стекле, энергия и длительность импульса накачки которого были равны ~ 8 кДж и ~ 1.5 мс. Лазер работал в режиме одиночных импульсов с периодом их следования ~ 3 мин.

Схема измерений характеристик РР, поглощающих излучение неодимового лазера I , представлена на рис.1. Для улучшения равномерности распределения интенсивности ЛИ, падающего на кювету с раствором, лазерный пучок с первоначальным диаметром ~ 20 мм диафрагмировался до диаметра ~ 7 мм, что позволяло вырезать цен-

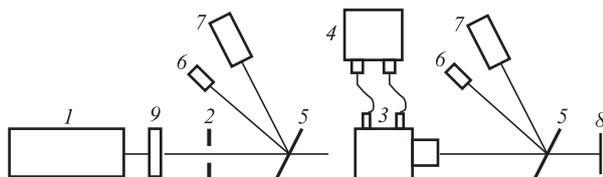


Рис.1. Схема установки для исследования оптотермодинамических характеристик расслаивающихся растворов:

1 – лазер; 2 – диафрагма; 3 – кювета; 4 – термостат; 5 – отклоняющие пластины; 6 – фотодиоды; 7 – измерители энергии; 8 – фотобумага; 9 – набор нейтральных светофильтров.

тральную, наиболее однородную, часть пучка. Измерения временного распределения мощности излучения лазера на входе и выходе кюветы 3 со слоем раствора толщиной 3 мм осуществлялись с помощью фотодиодов 6, сигнал с которых подавался на двухлучевой запоминающий осциллограф. Энергия излучения на входе и выходе кюветы измерялась твердотельными калориметрами 7. Для контроля за поперечным сечением лазерного пучка использовалась засвеченная фотобумага 8. Плотность энергии излучения лазера могла варьироваться с помощью набора нейтральных светофильтров 9.

Юстировка и исследование реакции системы на оптотермодинамическое воздействие проводились с помощью зондирующего одноимодового излучения He–Ne-лазера ($\lambda = 633$ нм, мощность ~ 0.5 мВт, диаметр пучка ~ 1 мм), распространявшегося по оси пучка неодимового лазера.

Контроль за приближением РР к состоянию равновесия на ранней стадии процесса светоиндуцированного спиноподобного распада, возбуждаемого излучением лазера I , осуществлялся по измерению интенсивности излучения зондирующего He–Ne-лазера, прошедшего через слой РР. Для регистрации ЛИ использовался ФЭУ, расположенный в плоскости действительного увеличенного изображения засвечиваемого объема РР, причем диафрагмирование ФЭУ приводило к уменьшению диаметра зондируемой области раствора до ~ 0.5 мм в месте пересечения пучка неодимового лазера со слоем раствора. На входе ФЭУ размещался интерференционный светофильтр, выделяющий прошедшее через РР излучение зондирующего лазера.

4. Результаты исследования

По данным измерений спектров пропускания РР был определен показатель поглощения на длине волны генерации неодимового лазера 1.06 мкм. Для раствора ТЭА–вода он составил 0.16 ± 0.01 см $^{-1}$, а для раствора БОЭ–вода – 0.17 ± 0.01 см $^{-1}$. С целью увеличения скорости и глубины внедрения раствора в область расслаивания при поглощении ЛИ в РР вводилась водорастворимая соль CuCl_2 , при этом показатели поглощения РР на $\lambda = 1.06$ мкм увеличивались примерно в 10 раз.

Результаты измерений зависимостей пропускания исследованных растворов от интенсивности I падающего ЛИ (рабочие характеристики ОИЛИ), полученные при различных начальных отклонениях ΔT_i температуры РР от критического значения, представлены на рис.2. Видно, что коэффициент ослабления интенсивности падающего излучения $k = T_0/T$ (T_0 – начальное пропускание) растет при уменьшении ΔT_i . Значения k максимальны при $\Delta T_i = 0.01$ К и $I \sim 55$ кВт/см 2 и составляют ~ 10 для РР ТЭА–вода и ~ 4 для РР БОЭ–вода.

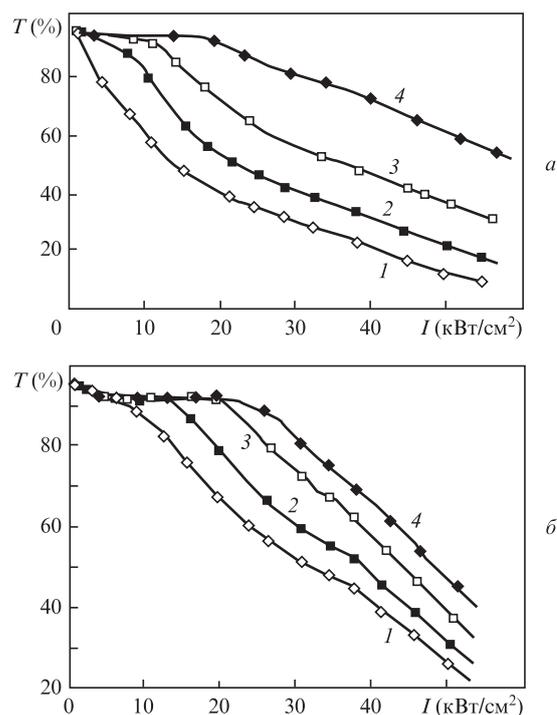


Рис.2. Зависимости пропускания T от интенсивности I лазерного излучения ($\lambda = 1.06$ мкм), падающего на кюветы с РР ТЭА–вода (а) и БОЭ–вода (б). Начальное отклонение от критической температуры $\Delta T_i = 0.01$ (1), 0.05 (2), 0.20 (3) и 0.55 К (4) (а) и 0.01 (1), 0.05 (2), 0.20 (3) и 0.90 К (4) (б).

Обращает на себя внимание заметное ослабление ЛИ в РР при средней интенсивности лазерного излучения, на несколько порядков меньшей, чем в случае типичных ОИЛИ (10 – 100 МВт/см 2) [4–7].

Анализ осциллограмм импульсов излучения лазера до и после прохождения их через кювету с нелинейной средой (рис.3) показывает, что передний фронт импульса, прошедшего через РР, примерно повторяет форму переднего фронта импульса падающего излучения. В отличие от этого, задний фронт прошедшего импульса сдвинут к его началу, что связано с ослаблением падающего ЛИ в нелинейно-оптической среде РР. В случае РР ТЭА–вода этот эффект менее заметен из-за меньшего значения интенсивности ЛИ.

5. Заключение

В результате исследований ослабления ЛИ в критических РР ТЭА–вода и БОЭ–вода показана возможность создания лабильного состояния (фазовой неустойчивости), релаксация которого в устойчивое состояние происходит с образованием микрогетерофазных неоднородностей концентрации и с последующим расслоением, что вызывает усиление рассеяния излучения вблизи критической температуры. Реализовано ограничение интенсивности ИК лазерного излучения с использованием светоиндуцированного критического рассеяния света. Приведены результаты измерений характеристик ОИЛИ на основе исследованных растворов при различной интенсивности падающего ЛИ, полученные при различных начальных отклонениях ΔT_i температуры жидкостей от критической. Ослабление падающего излучения увеличивается при уменьшении ΔT_i и достигает максимального зна-

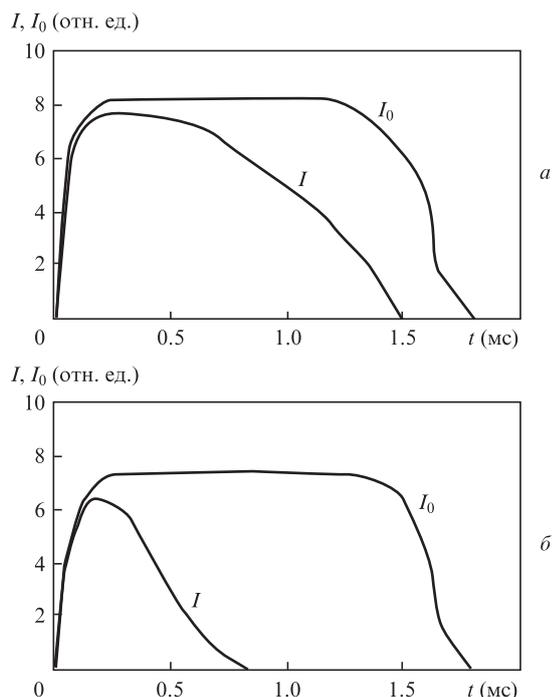


Рис.3. Осциллограммы интенсивностей импульсов падающего излучения I_0 и прошедшего через слои растворов излучения I для РР ТЭА–вода (а) и БОЭ–вода (б) при $\Delta T_i = 0.01$ К, $I_0 = 8$ (а) и 35 кВт/см² (б).

чения ~ 10 в случае РР ТЭА–вода. Экспериментальные значения интенсивности ЛИ при этом сравнительно невелики – на несколько порядков меньше, чем в случае типичных ОИЛИ.

Авторы признательны И.В.Комлеву и М.А.Тавризовой за подготовку экспериментальных образцов расслаивающихся растворов и В.Н.Семену за участие в интерпретации полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (госконтракт 16.740.11.0765), фонда Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (грант № МК-16.120.11.5559) и Фонда со-

действия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (контракт 9610p/16276).

1. Барачевский В.А., Лашков Г.И., Цехомский В.А. *Фотохромизм и его применения* (М.: Химия, 1977, с. 279).
2. Guiliano C.R., Hess L.D. *IEEE J. Quantum Electron.*, **3**, 358 (1967).
3. Грязнов Ю.М., Лебедев О.Л., Частов А.А. *ЖПС*, **11**, 76 (1969).
4. Tutt L.W., Voggess T.F. *Prog. Quantum Electron.*, **17**, 299 (1993).
5. Hollins R.C. *Nonlinear Optics*, **27**, 1 (2001).
6. Копылова Т.Н., Луговский А.П., Подгаецкий В.М., Пономарева О.В., Светличный В.А. *Квантовая электроника*, **36**, 274 (2006).
7. Белоусова И.М., Данилов О.Б., Сидоров А.И. *Оптический журн.*, **76**, 71 (2009).
8. Sliney D.H., Dennis J.E. *J. Laser Appl.*, **6**, 159 (1994).
9. Скрипов В.П., Скрипов А.В. *УФН*, **128**, 193 (1979).
10. Бункин Ф.В., Подгаецкий В.М., Семин В.Н. *Письма в ЖТФ*, **14**, 162 (1988).
11. Подгаецкий В.М. *Лазер-Информ*, № 15-16 (366-367), 6 (2007).
12. Gerasimenko A.Yu., Podgaetsky V.M., Semin M.V., Simunin M.M. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, **19**, 274 (2010).
13. Huang J.S., Goldberg W.I., Bjerkaas A.W. *Phys. Rev. Lett.*, **32**, 921 (1974).
14. Бункин Н.Ф., Давыдов М.А., Китаев Н.П., Ляхов Г.А. *Письма в ЖЭТФ*, **37**, 147 (1983).
15. Бункин Н.Ф., Давыдов М.А., Ляхов Г.А., Шмаонов Т.А. *ЖЭТФ*, **86**, 963 (1984).
16. Давыдов М.А., Ляхов Г.А., Сатыев Е.Р., Шипилов К.Ф. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **53**, 1576 (1989).
17. Антонов А.В., Бункин Н.Ф., Лобеев А.В., Ляхов Г.А. *ЖЭТФ*, **99**, 1718 (1991).
18. Антонов А.В., Бункин Н.Ф., Краснослободцев А.В., Лобеев А.В., Ляхов Г.А., Маляровский А.И. *ЖЭТФ*, **104**, 2761 (1993).
19. Ляхов Г.А., Шипилов К.Ф., Шмаонов Т.А. *Письма в ЖЭТФ*, **60**, 93 (1994).
20. Бункин Н.Ф., Лобеев А.В., Ляхов Г.А., Свирко Ю.П. *Квантовая электроника*, **23**, 62 (1996).
21. Бункин Н.Ф., Лобеев А.В., Ляхов Г.А. *УФН*, **167**, 1069 (1997).
22. Бункин Ф.В. *Письма в ЖЭТФ*, **19**, 302 (1974).
23. Бункин Ф.В., Трибельский М.И. *УФН*, **130**, 193 (1980).
24. Fugrow G., Greer S. *J. Chem. Phys.*, **73**, 3474 (1983).
25. Troen J., Bloemen E., Van Dael W. *J. Chem. Phys.*, **68**, 735 (1978).
26. Isumi Y., Dondos A., Picot C., Benoit H. *J. Phys.*, **42**, 353 (1981).
27. Коган В.Б., Фридман В.М., Кафаров В.В. *Справочник по растворимости* (М.-Л.: изд-во АН СССР, 1961, т. 1, с. 961).
28. Бункин Ф.В., Мельников Л.С., Подгаецкий В.М., Трибельский М.И. *Письма в ЖТФ*, **5**, 521 (1979).