

ОПТИКА СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

УДК 621.378.33

Н.Н. Бочкарев¹, А.А. Землянов¹, Ал.А. Землянов², А.М. Кабанов¹,
Д.В. Карташов³, А.В. Кирсанов³, Г.Г. Матвиенко¹, А.Н. Степанов³

Экспериментальное исследование взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с аэрозолем

¹ *Институт оптики атмосферы СО РАН,*

² *Сибирский физико-технический институт, г. Томск*

³ *Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород*

Поступила в редакцию 9.11.2004 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия лазерных импульсов фемтосекундной длительности с различным по составу жидкокапельным аэрозолем, а также с одиночными частицами. Оптическим и акустическим методами исследовались затухание энергии фемтосекундных импульсов при прохождении ими аэрозольного слоя, а также энергетические потери образовавшегося при различных фокусировках филамента. Экспериментально установлено, что нелинейное взаимодействие с атмосферным аэрозолем существенно не влияет на энергетические характеристики излучения.

Изучение нелинейно-оптических эффектов, возникающих при распространении в аэрозоле лазерных импульсов с интенсивностью, достижимой при сверхкоротких длительностях импульса, а также исследование распространения фемтосекундных лазерных импульсов при реализации филаментации как в газовой атмосфере, так и при ее аэрозольном заполнении имеет важное значение для задач транспортировки лазерной энергии через атмосферную толщу и для зондирования атмосферы.

Нами были проведены экспериментальные исследования взаимодействия лазерных импульсов фемто- и наносекундной длительности с модельными аэрозольными средами и отдельными частицами. Источник лазерных импульсов — Ti:Sa-лазер, генерирующий импульсы с длиной волны $\lambda = 0,8$ мкм, длительностью импульса $t_{\text{и}} = 80$ фс и 9 нс при энергии в импульсе < 17 мДж. Ширина спектра излучения для фемто- и наносекундных импульсов на полувысоте ~ 25 нм. Распределение интенсивности по сечению пучка близко к гауссову, диаметр пучка на уровне $0,135I_{\text{max}}$ составляет 8 мм. Аэрозольная среда с частицами радиусом $r = 2,5$ мкм, протяженностью 1,3 см, концентрацией частиц $N < 10^7$ см⁻³.

Для моделирования аэрозольных сред диспергировалась чистая вода и вода с включениями наночастиц серебра. Наночастицы использовались для увеличения поглощающих свойств аэрозоля, чтобы оценить различия в энергетических потерях фемто- и наносекундных импульсов при их прохождении через аэрозольную среду. Для измерения данных потерь использовались два канала регистрации — оптический и акустический. С помощью оптическо-

го канала измерялось ослабление излучения в аэрозольной среде. Измерения акустического отклика позволяли оценить энергетические потери излучения в аэрозоле за счет диссипации энергии излучения в тепловую при ее поглощении веществом аэрозольных частиц.

Акустическая часть установки включала два канала регистрации, калиброванных по звуковому давлению, с линейным частотным диапазоном 2–100 кГц. Регистрация оптических и акустических сигналов осуществлялась цифровыми осциллографами Tetronix и Infinium. При исследованиях филамента использовалось фокусирующее зеркало с фокусным расстоянием f , равным 120 или 86,5 см. При исследовании взаимодействия нефокусированных лазерных импульсов с аэрозольной средой вместо фокусирующего зеркала использовалась поворотная пластина. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Пропускание аэрозольного слоя измерялось на двух длинах волн: воздействующего, мощного лазерного импульса с $\lambda = 0,8$ мкм и зондирующего непрерывного излучения He–Ne-лазера с $\lambda = 0,63$ мкм. Зондирующее маломощное излучение, для которого заведомо не реализуются нелинейные эффекты, требовалось для контроля концентрации частиц N в аэрозольной среде для каждого пуска Ti:Sa-лазера.

Пропускание фемто- и наносекундных импульсов рассчитывалось по измерениям прошедшего аэрозольный слой импульса и опорного сигнала, показания которого калибровались по измерениям энергии импульса с помощью ИМО-2М для каждой серии измерений.

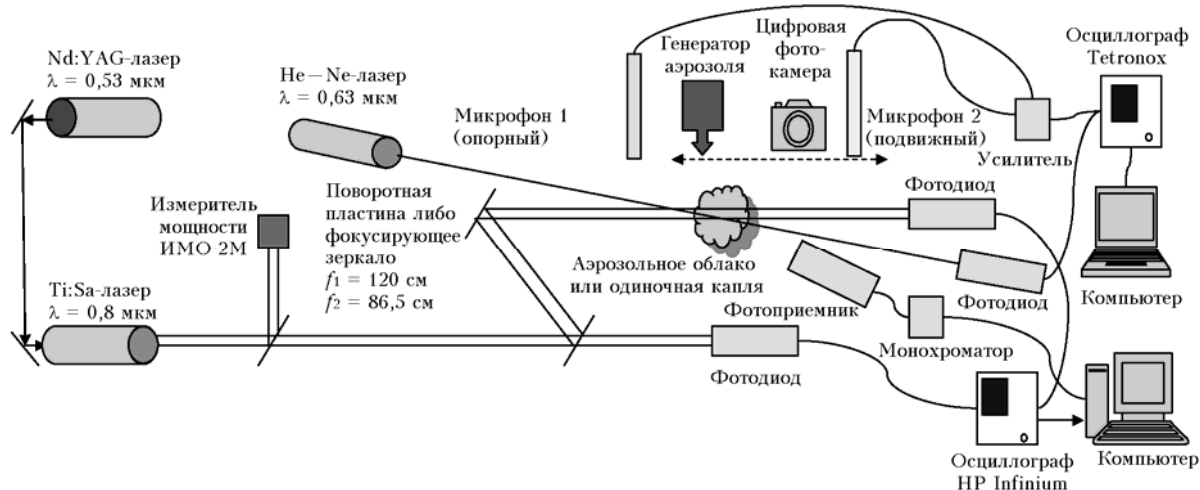


Рис. 1

Результаты измерений представлены на рис. 2. Видно, что как для непрерывного зондирующего излучения с $\lambda = 0,63$ мкм, так и для импульсного интенсивного излучения с $\lambda = 0,8$ мкм пропускание соответствует закону Бугера, хотя для импульсного излучения экспериментальные значения лежат несколько ниже расчетной кривой, что, возможно, соответствует увеличению ослабления за счет реализации в аэрозоле эффектов многофотонного поглощения.

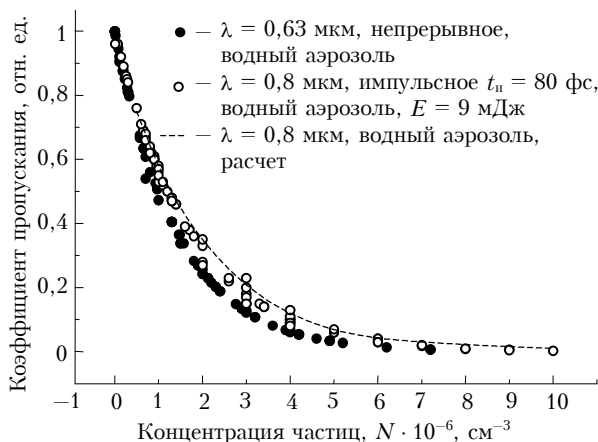


Рис. 2. Зависимость пропускания аэрозольного слоя от концентрации частиц

Измерение акустического отклика позволяло, в случае реализации нелинейно-оптических эффектов при взаимодействии излучения с веществом, контролировать, хотя и косвенно, энергетику излучения, в том числе при филаментации пучка.

Специальные меры звукоизоляции измерительных микрофонов от внешнего акустического шума (работающая установка), достигавшего звуковых давлений $\sim 0,025$ Па, не применялись. Поэтому при обработке малых акустических откликов со звуковыми давлениями до $\sim 0,001$ Па использовалось разработанное авторами программное обеспечение «Атмосферная оптоакустика» [1], содержащее расширенный инструментарий для оптимальной обработки оптоакусти-

ческих цифровых данных, а именно для компенсации частотных и фазовых искажений каналов регистрации, оптимальной полосовой фильтрации полезных сигналов на фоне внешних акустических шумов и аппаратурных помех и компенсации нелинейных, дифракционных и диссипативных искажений регистрируемых оптоакустических сигналов, исходя из конкретных условий проведения эксперимента.

Измерения акустического отклика от филамента на различных расстояниях R от фокуса зеркала показали, что при фокусировке зеркалами с фокусными расстояниями $f = 86,5$ и 120 см для $R = 0,1 \div 4,2$ м наблюдается существенное «угасание» филамента (рис. 3).

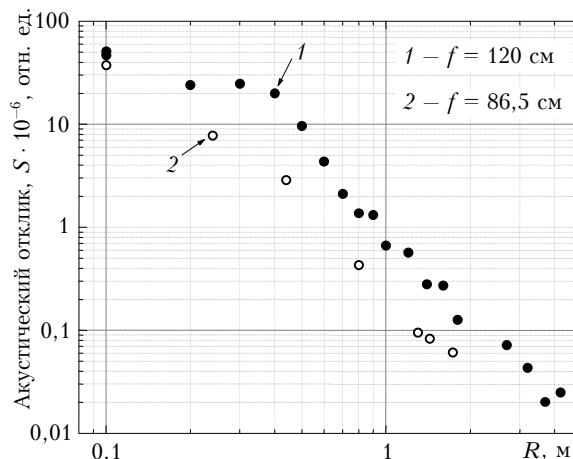


Рис. 3. Продольная зависимость интегрального акустического отклика, генерируемого каналом распространения лазерного излучения фемтосекундной длительности. Расстояние от микрофона до филамента – 1,5 см

Приемный микрофон опорного акустического сигнала (микрофон 1) находился на расстоянии $0,5$ м от фокуса зеркала. Микрофон 2 перемещался вдоль оптической оси фемтосекундного лазерного излучения от фокуса до расстояния $4,2$ м от него. Микрофоны были удалены от оптической оси излучения на $1,5$ см. Максимум частотного акустическо-

го спектра филамента изменялся в диапазоне 38–65 кГц, а пиковое звуковое давление – в диапазоне примерно 10^{-3} –5 Па. Для увеличения отношения сигнал-шум исходные данные фильтровались в диапазоне 10–250 кГц и дополнительно усреднялись по сериям из 64 импульсов. Среднее значение энергии фемтосекундного импульса для зависимостей на рис. 3 составило 12 мДж. Величина S на рис. 3 представляет собой интеграл от модуля акустического давления за период генерируемого акустического отклика.

Рис. 3 показывает, что на небольшом расстоянии от фокуса R филамент теряет энергию на порядки. Под энергией филамента в данном случае понимается та часть его энергии, которая формирует слабоионизованную плазму и затем диссипирует в тепловую энергию среды за счет рекомбинации электронов и ионов. Акустический сигнал, таким образом, фиксирует тепловые потери лазерного излучения, связанные с филаментацией пучка.

Зафиксированное уменьшение акустического отклика свидетельствует о том, что за фокусом филамент, как самоподдерживающееся образование, уже не существует. Расходящийся пучок не подпитывает филамент энергией, достаточной для баланса двух эффектов – нелинейности Керра для его фокусировки и образования плазмы для дефокусировки. Таким образом, в эксперименте, скорее всего, наблюдается распад сформированного еще в фокусе, филамента. Это же подтверждают и результаты сравнения потерь энергии при различных фокусировках. При менее жесткой фокусировке на расстоянии 0,4 м от фокуса филамент еще существует как стабильное образование, но затем происходит резкое уменьшение его энергоемкости. Подобная тенденция резкого уменьшения возбуждения среды за фокусом была зарегистрирована в [2] по измерениям степени ионизации канала распространения сфокусированного лазерного излучения фемтосекундной длительности.

Из рис. 4 видно, что регистрация акустического сигнала вдоль распространения лазерного излучения позволяет восстанавливать геометрический размер области с повышенной ионизацией.

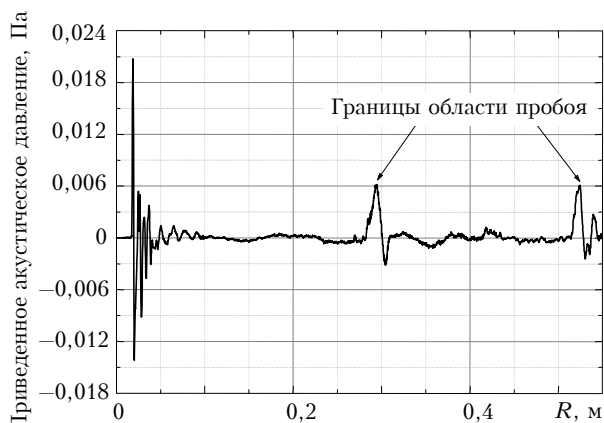


Рис. 4. Акустическое давление приведено к расстоянию 1 м, $P_{пр} = P_{изм}R$. Микрофон на удалении 1,5 см от пучка лазерного излучения

Первый импульс соответствует сигналу, принимаемому от лазерного пучка в момент его прохождения в непосредственной близости (1,5 см) от микрофона. Второй и третий сигналы – границы зоны повышенной ионизации после фокуса и до фокуса. Так, для случая, представленного на рис. 4, данная область составляет 23 см.

На рис. 5 приведены зависимости пикового давления в акустическом сигнале от коэффициента пропускания аэрозольной среды на длине волны зондирующего излучения.

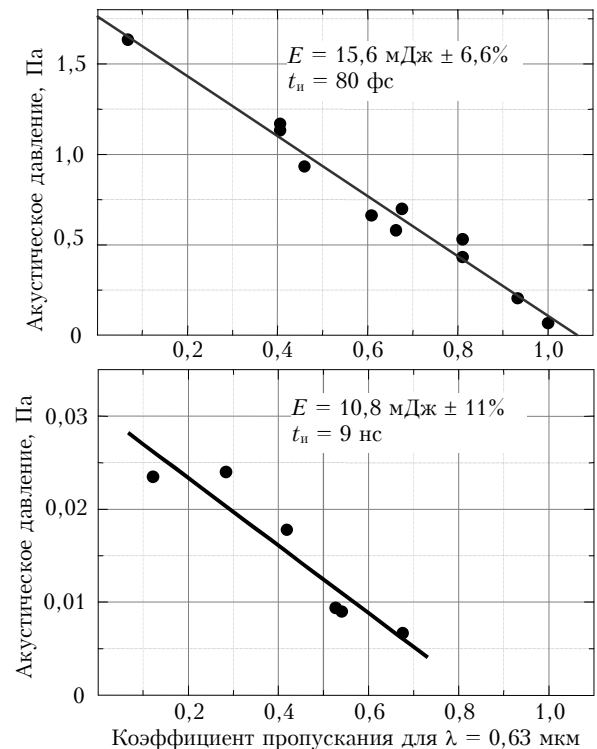


Рис. 5. Зависимость пикового акустического давления, генерируемого водным аэрозолем с наночастицами, от коэффициента пропускания. Расстояние от микрофона до аэрозольной среды – 5 см. E – энергия лазерного импульса

Интересно, что при переходе от фемтосекундного импульса к наносекундному, при сохранении энергетика импульса, наблюдается уменьшение амплитуды акустического отклика на два порядка. Возможны два сценария. Первый – поскольку воздействие отличается лишь интенсивностью (но на 5 порядков!), для фемтосекундного режима реализуется многофотонное поглощение в веществе аэрозольных частиц. Второй – для фемтосекундного режима можно пренебречь оттоком тепла от наночастиц серебра, внедренных в частицу аэрозоля, и тогда в локальных областях капли реализуются режимы перегрева и взрывного вскипания жидкости, акустический отклик которых выше, чем для случая теплового и испарительного механизмов генерации акустического отклика. Однако интерпретация полученного результата с использованием того или другого механизма требует детальной

оценки. К тому же данные механизмы не являются взаимоисключающими.

Еще один цикл исследований был связан с изучением люминесценции подвешенной на капилляре капли с красителем (родамин 6Ж) при двухфотонном поглощении импульсов фемтосекундной длительности на длине волны 0,8 мкм.

Спектр двухфотонно-возбужденной люминесценции красителя в капле регистрировался с помощью монохроматора и CCD-камеры. Дисперсия монохроматора с решеткой 1200 штр./мм составляла 2,4 нм/мм. Типичные спектрограммы, полученные для разных величин энергии возбуждения, представлены на рис. 6. Вертикальный размер изображения на рис. 6 соответствует размеру капли (2 мм), горизонтальный – распределению по спектру (приблизительно 45 нм), середина спектральной картины – 580 нм.

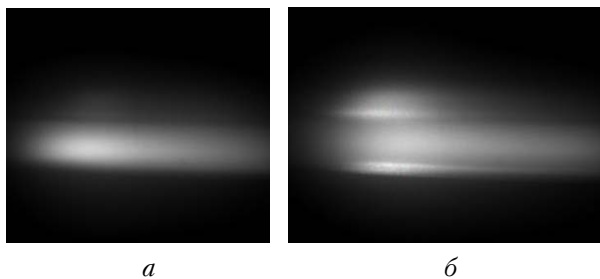


Рис. 6. Спектрограммы люминесценции капли с красителем при возбуждении лазерным импульсом фемтосекундной длительности

Сравнивая спектрограммы, полученные при различных энергиях возбуждающего излучения (спектрограмма *a* на рис. 6 соответствует энергии возбуждения 7,3 мДж, *б* – 16,5 мДж), можно видеть существенную пространственно-спектральную неоднородность свечения разных участков капли. А именно: при больших накачках спектрально ярче светятся зоны, соответствующие верхней и нижней границам капли.

Спектры свечения различных участков капли приведены на рис. 7. При этом ряд 1 соответствует верхней области капли, ряд 2 – центральной части капли на рис. 6,б. Если спектр свечения центральной части представляет собой типичный спектр спонтанной двухфотонно-возбужденной люминесценции родамина 6Ж, то спектр свечения верхней части существенно уже и смещен в коротковолновую область.

Поскольку границы капли являются границами шепчущей галереи, то возможное объяснение наблюдаемых пространственно-спектральных отличий связано с процессами, происходящими в этой зоне, в которой, как известно, несколько повышена плотность мощности возбуждающего излучения. Верхняя часть спектрограммы соответствует месту соединения капли с капилляром, т.е. там происходят разрыв квазисферической поверхности капли и, соответственно, нарушение полного внутреннего отражения для соответствующих лучей. Нижняя

часть характеризуется другой степенью сферичности по сравнению с центральной частью капли.

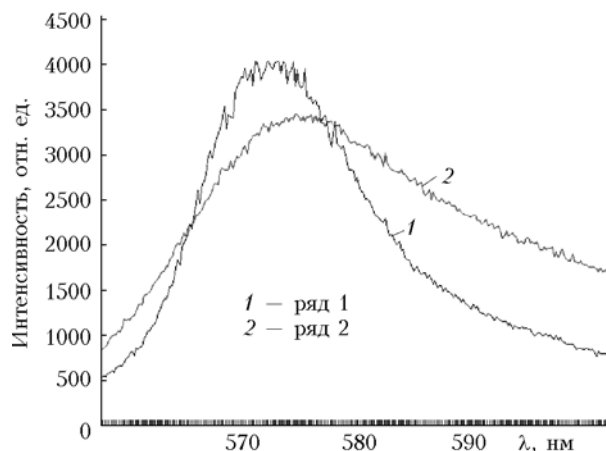


Рис. 7. Спектр люминесценции капли с красителем при возбуждении лазерным импульсом фемтосекундной длительности. Энергия в импульсе 16,5 мДж

Таким образом, в верхней и нижней частях капли нарушаются условия полного внутреннего отражения для лучей, распространявшихся прежде в центральной части под углами полного внутреннего отражения к поверхности капли. Тогда излучение из верхней и нижней частей капли содержит большую долю лучей из зоны шепчущей галереи (т.е. зоны с повышенной плотностью мощности накачки), чем свечение всего объема капли. Подобные спектральные отличия наблюдались нами ранее при однофотонном возбуждении красителей наносекундными импульсами в условиях насыщения поглощения [3].

На основе проведенного цикла экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

Прозрачность водного аэрозоля при распространении в нем лазерных импульсов фемтосекундной длительности, измеренная на длине волны зондирующего непрерывного излучения, не изменяется. Соответственно не изменяется микроструктура аэрозоля, а следовательно, не реализуются тепловые эффекты испарения и взрывного вскипания вещества аэрозольных частиц. При реализации оптического пробоя в аэрозоле, зафиксированного в ряде случаев акустическим методом, оптическая толща тумана также не меняется. Это свидетельствует о том, что очаги пробоя формируются внутри небольшого количества аэрозольных частиц и, не имея подпитки энергией от короткого лазерного импульса, не развиваются.

Акустический отклик взаимодействия фемтосекундного импульса с аэрозольной средой, при добавлении в диспергируемую воду наночастиц серебра, на два порядка превышает отклик взаимодействия наносекундного импульса такой же энергетичности, с той же средой. Это указывает на дополнительные энергетические потери лазерной энергии при ее распространении через аэрозольную среду в формате фемтосекундного импульса. Данные по-

тери не превышают нескольких процентов, что соответствует и оптическим измерениям.

Измерения акустического отклика распространения филамента, сформированного при фокусировке лазерного излучения, указывают на то, что филамент существует как саморегулирующаяся форма лишь вблизи фокуса.

Измерения акустического сигнала в открытом объеме являются эффективным инструментом при исследовании взаимодействия лазерных импульсов фемтосекундной длительности с аэрозольными средами и при изучении распространения филамента в аэрозольных и газовых средах. Метод позволяет восстанавливать энергетические свойства филаментированного лазерного излучения, геометрические размеры филамента, пропускание аэрозольного слоя для лазерного импульса фемтосекундной длительности как для случая реализации филаментации пучка, так и без него.

N.N. Bochkarev, A.A. Zemlyanov, Al.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, D.V. Kartashov, A.V. Kirsanov, G.G. Matvienko, A.N. Stepanov. Experimental investigation of the interaction of femtosecond laser pulses with aerosol.

The interaction of femtosecond laser pulses with various-composition (aqueous, with dye solution and nanoparticles) aerosol, as well as with individual particles in the case of two-photon induced fluorescence excited in them has been investigated experimentally. An acoustic method was applied to study the decay of energy of a filament formed at different focusing and the transmission of the filament energy as the filament passes through an aerosol layer.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 02-05-65180, 03-05-64431, 03-05-64228), Программы 2.9 Отделения физических наук РАН, Программы Президиума РАН «Фемтосекундная атмосферная оптика», Программы № 12 Президиума СО РАН.

1. *Бочкарев Н.Н., Кабанов А.М., Погодаев В.А.* Оптика канала распространения мощного импульсного лазерного излучения в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 9. С. 816–821.
2. *Tzortzakis S., Lamououx B., Chiron A., Franko M., Prade B., Mysyrowicz A.* Nonlinear propagation of subpicosecond ultraviolet laser pulses in air // Opt. Lett. 2000. V. 25. N 17. P. 1270–1272.
3. *Донченко В.А., Землянов А.А., Землянов Ал.А., Кубиткин П.П., Копылова Т.Н.* Спектры флуоресценции в жидких частицах с красителем при интенсивной лазерной накачке // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 1. С. 36–38.