



УДК 53.082.532

Е.И. Мареев, Ф.В. Потемкин Ф.В., В.М. Гордиенко.

Физический факультет и Международный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова
119991, Москва, Ленинские горы, 1 стр.62, E-mail: mareev.evgeniy@physics.msu.ru

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ФЕМТОСЕКУНДНОГО ФИЛАМЕНТА И ДИНАМИКА СОЗДАВАЕМЫХ ИМ УДАРНЫХ ВОЛН И КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЕЙ

АННОТАЦИЯ

В данной работе с помощью методики теневой фотографии исследовалась динамика индуцированных филаментом ударных волн и кавитационных пузырей, а также влияния на ней параметров среды, лазерного импульса и фокусировке. Было показано, что механические пост эффекты, происходящие на нано- (ударные волны) и микросекундном масштабе (кавитационные пузыри) могут использоваться для восстановления картины процессов на фемтосекундном масштабе времен (филаментация лазерного излучения).

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ФИЛАМЕНТАЦИЯ, ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И КАВИТАЦИОННЫЕ ПУЗЫРИ, ТЕНЕВАЯ ФОТОГРАФИЯ

ВВЕДЕНИЕ

При фокусировке фемтосекундного ИК импульса с мощностью, превышающей критическую мощность самофокусировки в кювету с водой, приводит к его самоканалированию. То есть имеет место филаментация лазерного излучения – процесс динамического баланса между керровской фокусировкой, плазменной дефокусировкой и дифракцией [1]. Параметры образованного филамента сильно зависят от режима фокусировки и энергии лазерного импульса. При острой ($NA > 0,3$) фокусировке высокоэнергичного лазерного импульса в воду в среде формируется суперфиламент – стабильная от импульса к импульсу структура, возникающая в результате взаимодействия множественных отдельных филаментов. При относительно мягкой ($NA < 0,1$) фокусировке в среде наблюдается множество отдельных филаментов, т.е. так называемая множественная филаментация. В промежуточном случае ($0,1 < NA < 0,3$), изначально образованный при входе в среду суперфиламент распадается на несколько отдельных филаментов. Электроны плазмы, создаваемой филаментом в среде ($n_e \sim 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$), обладают высокой энергией ($\sim 10 \text{ эВ}$) и сразу после своего образования начинают передавать энергию в атомный остов за счет их взаимодействия с ионной подсистемой, а их плотность уменьшается за счет процессов рекомбинации. В результате в области воздействия лазерного излучения происходит каскад быстрых фазовых переходов. В случае, когда фемтосекундное лазерное излучение фокусируется в воду, большой объем энергии, переданной в среду, приводит к испарению воды. Образованный плазмой тонкий слой водяного пара преобразуется в кавитационный пузырь. Высокие давление и температуры в области плазмообразования приводит к резкому расширению кавитационного пузыря и запуска ударной волны. Изначально граница кавитационного пузыря и ударная волна распространяются с одной скоростью. Но температура и давление внутри пузыря, а,

значит, скорость расширения постепенно падает, и от него отделяется ударная волна, которая быстро затухает (за несколько наносекунд) до акустической [2].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для получения изображений кавитационных пузырей и ударных волн использовалась методика теневой фотографии. В теневой фотографии используется два импульса: возбуждающий и зондирующий. Возбуждающий импульс фокусируется в среду и зажигает фемтосекундный филамент. Пробный импульс расширяется для создания равномерной засветки на камере, использующейся для записи результатов измерений. Фокусируя объектив на область пробоя, получается изображение этой области, где фронт ударной волны и кавитационные пузыри будут выглядеть как темные линии на фоне ярко освещенной лазерным пучком области. Темные области на фронте ударной волны являются результатом прохождения волны сжатия, достаточной для локального изменения показателя преломления среды. Этого изменения хватает для рефракции света за пределы апертуры объектива. Разница между показателями преломления в среде и в кавитационном пузыре также ведёт к рассеянию света. Варьируя время между моментом создания лазерного пробоя и временем снимка, можно получить картину происходящих процессов. Скорость ударной волны может быть получена, рассчитывая расстояние между центром плазмы и темным кольцом. Временное разрешение определяется длительностью лазерного импульса, а пространственное разрешение – разрешением оптической системы регистрации. В качестве возбуждающего импульса использовалось излучение Cr:Forsterite лазера $\lambda = 1240$ нм, $\tau = 140$ фс, частота повторения 10 Гц. С помощью асферических линз ($NA = 0,4$; $f = 3,3$ мм, $NA = 0,4$; $f = 4,6$ мм и $NA = 0,2$; $f = 8$ мм) лазерное излучение фокусируется в кювету с жидкостью. Для фокусирующей линзы с фокусным расстоянием 3,3 мм диаметр перетяжки составляет 4 мкм, а её длина порядка 20 мкм в воздухе. Для того чтобы убедиться в отсутствие aberrаций, были получены изображения плазмы, возникшей в результате оптического пробоя в воздухе и в воде. В воздухе наблюдается яркая искра, чей размер совпадает с расчётным. В воде же наблюдается протяженный плазменный канал. В качестве пробного импульса использовалась либо вторая гармоника Cr:Forsterite лазера для наблюдения ударных волн или вторая гармоника Nd:YAG лазера ($\lambda = 1064$ нм, $\tau = 10$ нс) для наблюдения кавитации. Задержка между импульсами варьировалась от 1 до 30 нс, с шагом 0,3 нс для наблюдения ударных волн и от 0,5 до 80 мкс с шагом 20 нс для наблюдения кавитационных пузырей.

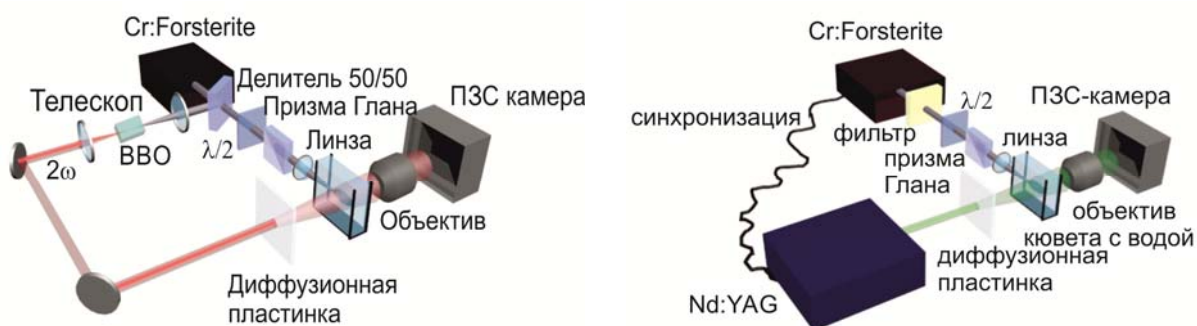


Рис. 1. Экспериментальная схема. Энергия возбуждающего импульса (Cr:Forsterite $\lambda = 1240$ нм, $\tau = 140$ фс) варьируется с помощью пластинки $\lambda/2$ и призмы Глана. С помощью асферической линзы возбуждающий импульс фокусируется в кювету с водой, где создает ударные волны и кавитационные пузыри. В качестве пробного импульса использовалась либо вторая гармоника Cr:Forsterite лазера для наблюдения ударных волн либо вторая гармоника Nd:YAG лазера ($\tau = 10$ нс). Пробный импульс рассеивается на диффузионной пластинке и собирается объективом на матрице ПЗС камеры

При острой фокусировки излучения в среду на границе раздела двух сред возникают aberrации, т.к. лучи, имеющие разный угол схождения преломляются на границе по-разному и фокусируются в разные точки среды. В экспериментах, когда было важно избежать aberrаций, фокусирующая линза погружалась в воду, что гарантировало отсутствие aberrаций от границы раздела двух сред. В случае экспериментов по изучению aberrаций от границы фокус линзы находился в воде, причем глубина погружения составляла, как минимум, половину фокусного расстояния, это производилось для увеличения aberrаций.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В условиях жесткой фокусировки в экспериментах наблюдалось два режима генерации ударной волны. При энергиях, лишь немного превосходящих пороговые, наблюдалась одна сферическая ударная волна рис. 2, а. С повышением энергии образовывался протяженный плазменный канал, каждая точка которого становилась источником ударных волн, и, как результат, наблюдалась одна цилиндрическая ударная волна рис. 2, б – г. Интересно заметить, что использование теневой фотографии позволяет определить, что структура не полностью однородна, а в ней присутствуют максимумы интенсивности, которые и становятся центрами образования ударных волн. Используя теневые фотографии, легко определить диаметр ударной волны, и, значит, можно получить временные и энергетические зависимости диаметра рис. 2, д. Динамика ударных волн полностью описывается уравнениями гидродинамики, [4]. Образование такой цилиндрической ударной волны связано с образованием в среде суперфиламента, каждая точка которого становится центром генераций сферических ударных волн. Суперфиламент же возникает за счет того, что высокие интенсивности ($I \sim 10^{13} - 10^{14} \text{ Вт/см}^2$) и высокая локализация энергии зажимают множество мелкомасштабных филаментов в крайне малый объем, что ведет к активному обмену энергии между ними и образованию стабильной структуры.

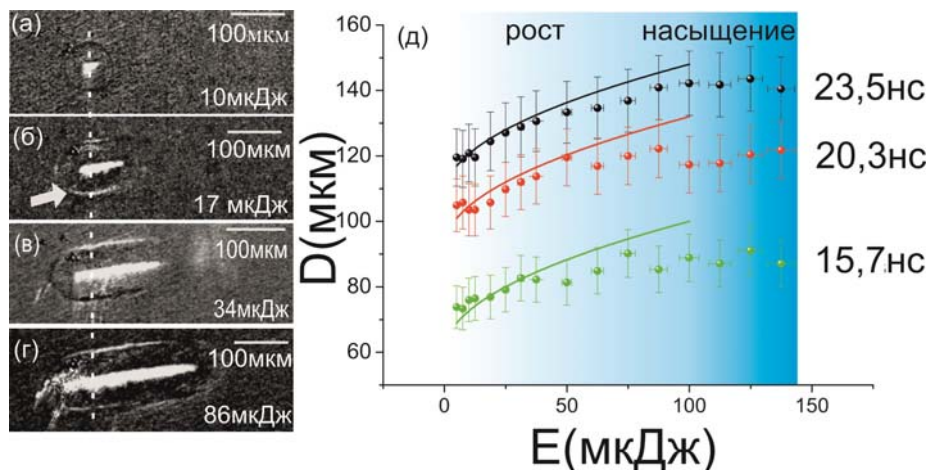


Рис. 2. (а – г) Теневые фотографии ударных волн при задержке между пробным и возбуждающим импульсом 18,6 нс. Энергия возбуждающего импульса указана на рисунках. Пунктирной линией показано положение геометрического фокуса, стрелкой показано направление лазерного излучения. (д) Зависимость диаметра переднего фронта ударной волны от энергии для трех различных задержек. Линией показана корневая зависимости диаметра от энергии

При исследовании зависимости диаметра ударной волны от энергии лазерного импульса обнаружен выход радиуса на насыщение, это связано с насыщением интенсивности (Intensity clamping). С увеличением энергии лазерного импульса интенсивность насыщается, благодаря динамическому балансу процессов, имеющих место внутри лазерного филамента. Также обнаружен корневой выход на насыщение, связанный с тем, что ударная волна является сферической волной, а значит по закону сохранения массы, диаметр ударной волны падает как корневая функция пройденного расстояния (рис. 2, б). В

воде скорость лазерно-индуцированных ударных волн затухает экспоненциально, замедляясь до звуковой за времена порядка 150 нс.

Зная скорость фронта ударной волны и используя связь между скоростью и давлением на фронте ударной волны, можно оценить давления, создаваемые в среде [4]. Для энергии лазерного импульса 130 мкДж скорость фронта ударной волны составляет 2300 ± 200 м/с. Давление, отвечающее таким скоростям, составляет $1,0 \pm 0,1$ ГПа.

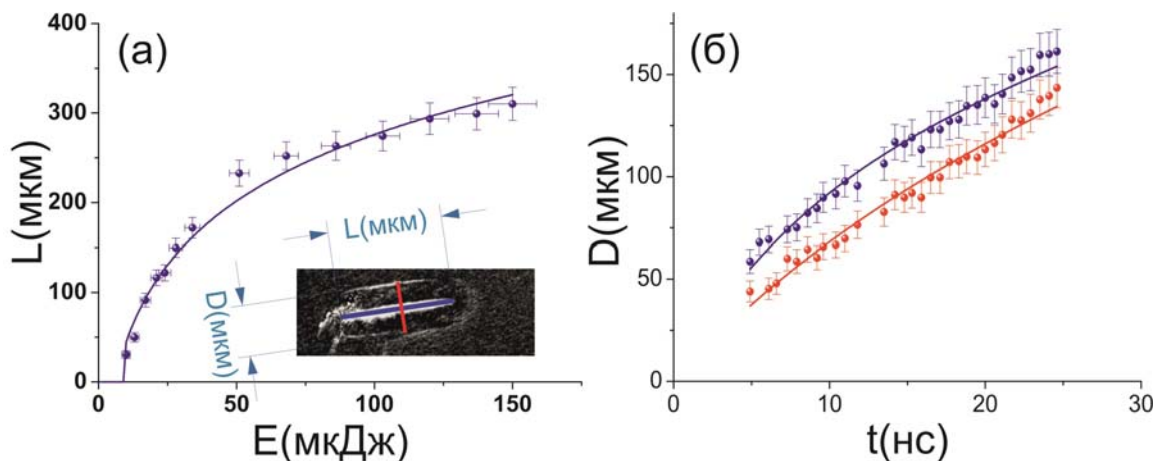


Рис.3. (а) Длина суперфиламента, зависящая от энергии лазерного импульса. Линия показывает логарифмическую зависимость. (б) Зависимость диаметра переднего и заднего фронта ударной волны от времени. Линия показывает экспоненциальную зависимость скорости ударной волны от времени

Местонахождение плазменного канала практически полностью совпадает с местонахождением области кавитации, так как кавитационные пузыри являются результатом испарения воды в области локализации плазмы. Знание поведения плазменного канала крайне важно, так как именно распределение плазмы определяет дальнейшую эволюцию ударной волны и области кавитации. В эксперименте было обнаружено (рис.3, а), что длина плазменного канала логарифмически зависит от энергии лазерного импульса, что также было обнаружено и в других средах [5].

Выход на насыщение диаметра ударной волны с увеличением её длины при росте энергии лазерного импульса связано возникает за счет ограничения энергии, выделяющейся в каждой точке пространства. В свою очередь это насыщение связано с насыщением интенсивности. Упрощая, при острой фокусировке высокие интенсивности зажимают излучение в тонкий канал, но так как вся энергия не может быть выделена в одной точке канал вынужден «прорасти» вглубь образца, причем интенсивность и электронная плотность практически неизменна внутри канала (суперфиламента).

Кавитационные пузыри, индуцированные филаментом ведут себя схожим образом. Каждая точка суперфиламента становится центром генерации сферического кавитационного пузыря, в результате возникает одна цилиндрическая область кавитации. Наложение друг на друга сферических кавитационных пузырей на микросекундном масштабе приводит к интенсивному обмену энергией между ними, а значит и к образованию потоков энергии, направленных к центру пузыря (рис. 4).

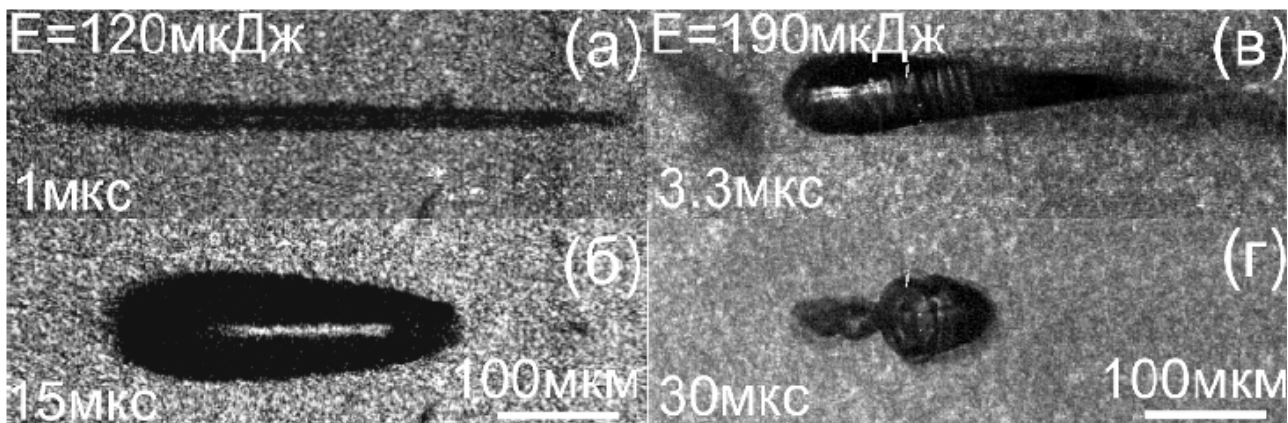


Рис.4. Теневые фотографии кавитационных пузырей (левая колонка) и ударных волн (правая колонка) при фокусировке излучения линзой с фокусным расстоянием 3.3 мм и числовой апертурой $NA = 0.4$. Излучение распространяется слева-направо. Масштаб, задержка между возбуждающим и пробным импульсом и энергия импульса указана на рисунке

Добавление aberrаций в оптическую схему ведет к образованию «горячих точек», в которых наблюдается локальный максимум интенсивности, причем в каждой последующей точке интенсивность падает. В результате в каждой такой горячей точке образуется кавитационный пузырь и формируется ударная волна (рис. 4, б). Таким образом образуется множество расположенных вдоль оптической оси кавитационных пузырей с убывающим диаметром (считая от точки входа импульса в среду). В такой конфигурации системы самые маленькие пузыри схлопываются в первую очередь, передавая энергию к первому пузырю, как результат в конце своей «жизни» в направлении лазерного импульса выбрасываются струи кавитационных пузырей (рис. 4, г). На наносекундном же масштабе времен происходит генерация сложной структуры ударных волн, причем каждая сферическая ударная волна генерируется в своей «горячей точке». Увеличение энергии приводит к зажиганию филамента в каждой точке, и, следовательно, уплощению образовавшейся структуры рис. 5.

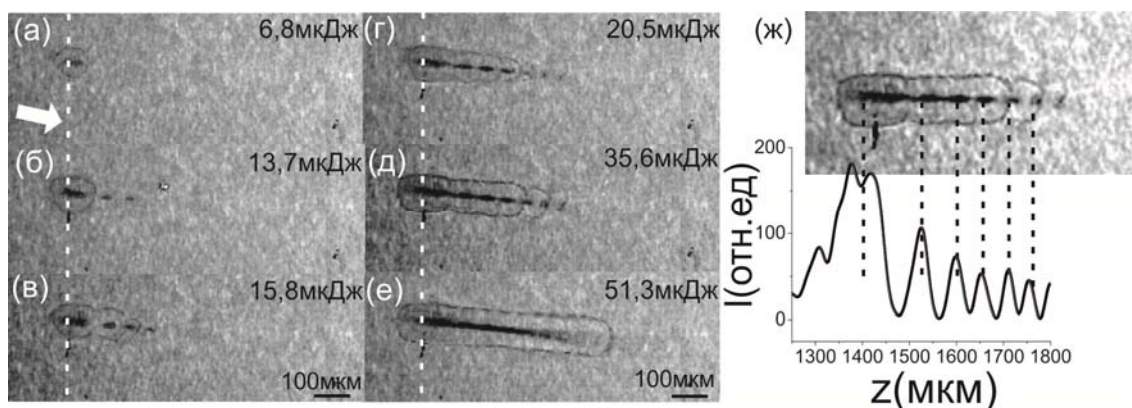


Рис.5. (а-е) Теневые фотографии ударных волн при фокусировке в двухкомпонентную среду. Задержка между возбуждающим и пробным импульсом 18,6 нс. Фокусировка проводилась линзой с $NA = 0,4$; $f = 4,6$ мм, положение фокуса указано пунктирной линией. (ж) Численный расчет интенсивности на оптической оси, совмещенная с теневой фотографией $d = 1400$ мкм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе показано, что процессы, происходящие на фемтосекундном масштабе времен при фокусировке ультракороткого ИК импульса в воду, а именно филаментация, определяют поведение системы на микросекундном масштабе времен. Таким образом, обладая знанием по характерным размерам и эволюции кавитационных пузырей и ударных волн, можно восстановить распределение электронной плотности и интенсивности

в среде. Также с помощью методики теневой фотографии было показано образование суперфиламента в среде при острой фокусировке фемтосекундного импульса в воду.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

I – интенсивность, Вт/(см²);
 n_e – концентрация электронов, см⁻³;
 τ – длительность импульса, фс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Couairon A., Mysyrowicz A.** Femtosecond filamentation in transparent media // Phys. Rep., 2007. № 441. С. 47-189.
2. **Potemkin F. V., Mareev E. I.** Dynamics of multiple bubbles, excited by a femtosecond filament in water // Laser Phys. Lett., 2015. №12. С. 015405.
3. **Potemkin F. V., Mareev E. I., Podshivalov A. A., Gordienko V. M.** Laser control of filament-induced shock wave in water // Laser Phys. Lett., 2014. №11. С. 106001.
4. **Lauterborn W., Vogel A.** Shock wave emission by laser generated bubbles // Под редакцией Delale C.F. Bubble Dynamics & Shock Waves, SHOCKWAVES 8, 2013. С. 67-103.
5. **Михеев П. М., Потёмкин, Ф. В.** Генерация третьей гармоники фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона, остро сфокусированного в объем прозрачного диэлектрика, в режиме формирования плазмы // Вестник МГУ, 2011. №1, С. 19-24.

E.I. Mareev, F.V. Potemkin, V.M. Gordienko

119991, Russia, Moscow, Faculty of Physics and International Laser Center M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, bld.1/62, E-mail: mareev.evgeniy@physics.msu.ru

SPATIO-TEMPORAL STRUCTURE OF FEMTOSECOND FILAMENT AND DYNAMICS OF FILAMENT-INDUCED CAVITATIONAL BUBBLES AND SHOCK WAVES

In the present work using shadow photography technique the dynamics of filament-induced shock waves and cavitation bubbles was investigated, additionally, the impact of the medium properties, laser pulse parameters and focusing geometry on the evolution of mechanical post-effects was demonstrated. It was shown, that mechanical post effects on nanosecond (shock waves) and microsecond (cavitation bubbles) timescale can be used for the recovery of processes on the femtosecond timescale (laser filamentation).

FEMTOSECOND FILAMENTATION, LASER-INDUCED SHOCK WAVES AND CAVITATION, SHADOW PHOTOGRAPHY