

Обратимый переход между однопучковой и многопучковой филаментацией излучения ВКР пикосекундных лазерных импульсов в воде при перемещении перетяжки пучка

С. М. Першин¹⁾, А. И. Водчиц²⁾, И. А. Ходасевич²⁾, Н. С. Новиков²⁾,
М. Я. Гришин¹⁾, В. А. Орлович²⁾

¹⁾ *Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия*

e-mail: pershin@kapella.gpi.ru

²⁾ *Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: v.orlovich@dragon.bas-net.by*

Продemonстрирован способ визуализации неоднородностей волнового фронта лазерного пучка по филаментации стоксова излучения вынужденного комбинационного рассеяния попутно импульсам лазера. Перемещение перетяжки фокусированного пучка пикосекундных импульсов вдоль кюветы с водой сопровождается обратимым переходом «однопучковая – многопучковая филаментация». Обнаружение неоднородностей волнового фронта лазерных пучков важно в задачах лазерного термоядерного синтеза для предотвращения индуцирования неустойчивостей в плазме.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР); вода (H₂O); вертикальная схема возбуждения; пикосекундные импульсы; поперечное распределение интенсивности в пучке; филаменты.

A reversible transition between single- and multibeam filamentation of picosecond-pulse-induced SRS radiation in water governed by the beam waist movement

S. M. Pershin¹⁾, A. I. Vodchits²⁾, I. A. Khodasevich²⁾, N. S. Novikov²⁾,
M. Ya. Grishin¹⁾, V. A. Orlovich²⁾

¹⁾ *A. M. Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia*

e-mail: pershin@kapella.gpi.ru

²⁾ *B. I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus*

e-mail: v.orlovich@dragon.bas-net.by

A method for visualizing wavefront inhomogeneities in a laser beam is demonstrated via filamentation of the stimulated Raman scattering Stokes component in the forward direction. The movement of the focused picosecond pulses beam waist along a water-filled cuvette is accompanied by a reversible transition “single-multibeam filamentation”. Detection of small inhomogeneities in the wavefront of laser beams is highly important in laser inertial fusion applications in order to reduce the probability of inducing instabilities in the plasma.

Keywords: stimulated Raman scattering (SRS); water (H₂O); vertical excitation scheme; picosecond pulses; transverse intensity distribution in a beam; filaments.

Введение

Лазерный термоядерный синтез и создание источников энергии на его основе для практических применений по настоящее время остаются активно обсуждаемыми темами [1, 2]. В последние годы для повышения эффективности

термоядерной реакции все большее внимание уделяется созданию мишеней для синтеза ускоренных частиц [2, 3]. Однако, как известно, для реализации термоядерного синтеза требуются сверхмощные лазерные источники с энергиями импульсов от сотен Дж до МДж, необходимыми для обеспечения релятивистских интенсивностей. Такие интенсивности достигаются с использованием последовательных усилительных каскадов, где требуются лазерные пучки с высокой степенью пространственной однородности волнового фронта в пучке. Качество волнового фронта обеспечивают фильтрацией «горячих точек» пространственными фильтрами между каскадами, чтобы снизить вероятность развития неустойчивостей в плазме на мишени. Целью настоящей работы является исследование пространственного поперечного распределения интенсивности в пучке лазерного пикосекундного излучения с помощью вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) на основе гигантского усиления флуктуаций волнового фронта пучка.

1. Эксперимент

В эксперименте использовалось вертикальное возбуждение ВКР в воде (H_2O) многомодовым пикосекундным лазерным излучением ($\lambda = 532$ нм) с расходимостью пучка $\sim 0,4$ мрад, длительностью импульсов ~ 50 пс и частотой следования 15 Гц, принципиальная схема которой приведена в [4] на рис. 1. Энергия импульсов (E_n) изменялась от 1 мДж до 12 мДж с помощью полуволновой пластинки и расположенного за ней под углом Брюстера поляризатора. Измерение энергии осуществлялось пирозлектрической головкой Ophir PE50BB-DIF-C с двухканальным дисплеем при усреднении по 150 импульсам. Лазерный пучок фокусировался линзой с $f = 83$ мм в кювету открытого типа с H_2O , диаметром 20 мм и длиной 75 мм, близко к ее центру, и проходил по нормали через поверхность воды. Глубина погружения h перетяжки сфокусированного пучка варьировалась от границы раздела воздух-вода (0 мм) до 64 мм в объеме H_2O с шагом 500 мкм. После кюветы располагались коллимирующая линза с фокусным расстоянием 130 мм и держатель со светофильтрами из цветного стекла КС11 и КС13, через которые генерируемое излучение попутного ВКР (ПВКР) направлялось на экран.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлено пространственное распределение поля пучка лазерного излучения накачки при разных энергиях импульсов.

Как видно на рис. 1, пространственное распределение пучка является однородным с близким к гауссовому профилем и возрастающей интенсивностью с увеличением энергии импульсов, диаметр пятна при этом практически не меняется.

При энергии лазерных импульсов $E_n \geq 8$ мДж возбуждение ВКР на поверхности воды и в слое $h \leq 5$ мм от нее приводило к оптическому пробое. Напротив,

на глубине $h = 16$ мм и более порог пробоя не достигался, и формировался пучок ПВКР круглого сечения (рис. 2).

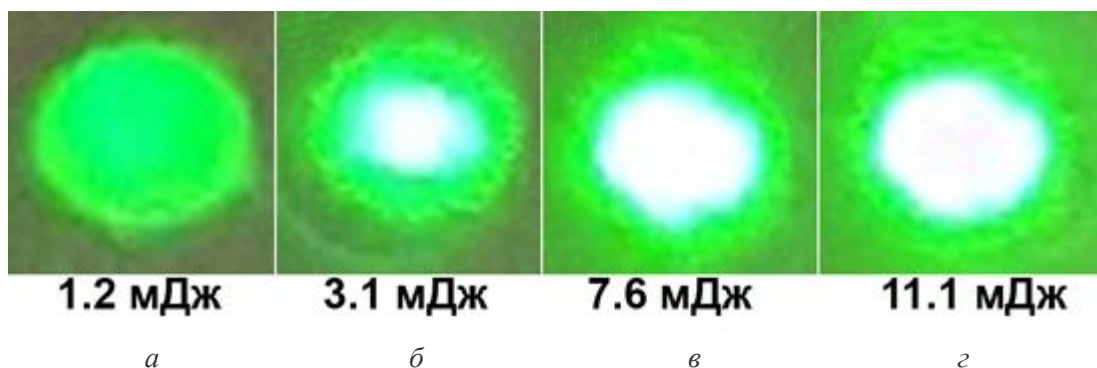


Рис. 1. Поперечное распределение интенсивности в пучке излучения накачки при фиксированной энергии импульсов E_n : а – 1,2 мДж; б – 3,1 мДж; в – 7,6 мДж; г – 11,1 мДж. Диаметр пучка на фотографии а составляет 8 мм

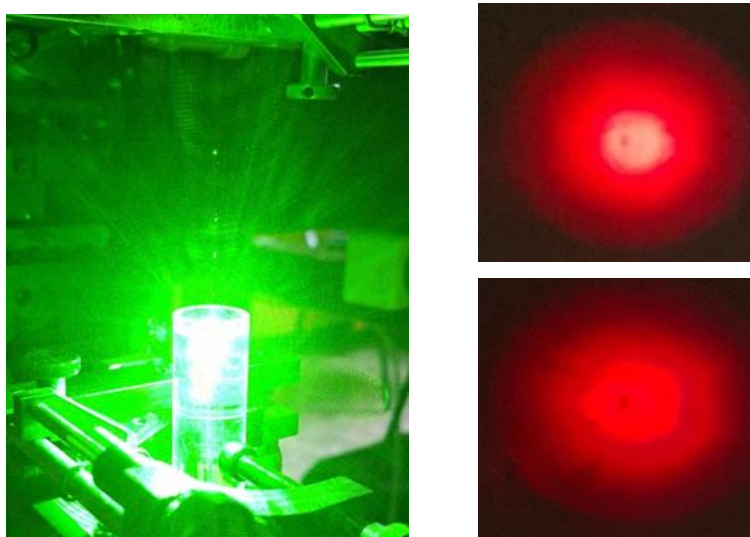


Рис. 2. Возбуждение ПВКР в слое $h = 5$ мм от поверхности при $E_n = 8$ мДж (слева) и пространственное распределение интенсивности в пучке излучения ПВКР на глубине $h = 16$ мм (справа вверху) и $h = 35$ мм (справа внизу) при $E_n = 11,1$ мДж и $E_n = 7,6$ мДж соответственно

В то же время, при допробойных энергиях импульса, например, $E_n = 7,6$ мДж, погружение перетяжки в объем воды сопровождалось формированием многопучкового распределения поля, характерного для филаментов [6, 7], как показано на рис. 3.

Как видно из рисунка, при возбуждении ПВКР ($\lambda \approx 650$ нм) на поверхности воды ($h = 0$ мм) формируются кольцевой и осевой пучки, как и в [4]. Диаметр осевого пучка и заполнение внутренней области от оси к кольцу увеличиваются с ростом глубины погружения ($h = 500$ мкм и 1,5 мм). При дальнейшем погружении перетяжки в воду с $h = 2$ мм до $h = 8$ мм формирование поля пучка ПВКР характеризуется хаотически возникающими пятнами, которые флуктуируют по пространству вблизи оси симметрии пучка накачки. Пятна заполняют все

пространство пучка при $h = 10$ мм, а далее ПВКР вновь формирует единый пучок, как показано на рис. 3 при $h = 12$ мм и на рис. 2 в слоях $h = 16$ мм и $h = 35$ мм. Иногда вокруг филамента наблюдается кольцо (рис. 2, $h = 2$ мм и 6 мм). Например, в CS_2 возникновение кольца вокруг филамента связывали с интерференцией сферической волны, дифрагирующей от точки в жидкости, с незахваченным пучком [5].

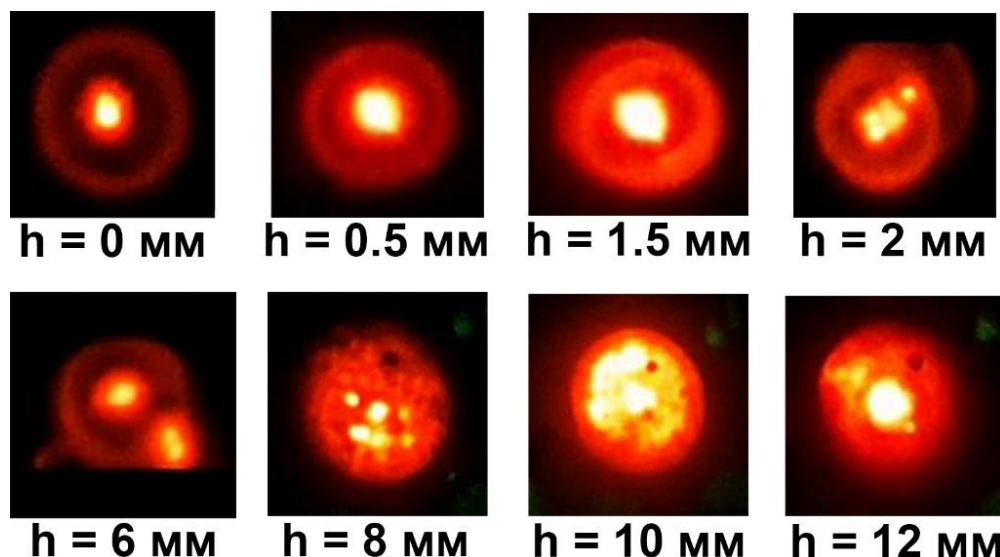


Рис. 3. Пространственное распределение интенсивности в пучке излучения ПВКР при энергии импульсов накачки $E_n = 7,6$ мДж на разных глубинах h погружения перетяжки пучка накачки

Критическая мощность самофокусировки в воде излучения на длине волны 532 нм, оцененная по данным [6], составляет ~ 1.7 МВт. Мощность лазерного излучения в нашем эксперименте составляла величину ~ 150 МВт. То есть, критическая мощность самофокусировки превышена значительно, и поэтому этот эффект способен оказывать влияние на формирование пространственного распределения интенсивности в пучке ПВКР. Согласно [8], если в импульсах накачки пиковая мощность в несколько десятков раз превышает критическую мощность самофокусировки, как в нашем случае, возможно образование множества филаментов на длине волны стоксовой компоненты из-за экспоненциального усиления флуктуаций на волновом фронте накачки после прохождения импульсом достаточного расстояния внутри воды. На малых глубинах погружения перетяжки пучка усиления ещё недостаточно для подчёркивания неоднородностей, которые проявляются при росте показателя экспоненты с увеличением длины пробега импульса в воде. Отсюда следует, что филаменты в поле стоксовой компоненты отражают неоднородность волнового фронта накачки. Их возникновение является следствием мелкомасштабной самофокусировки светового поля высокой интенсивности, обладающего «пространственной неустойчивостью к малым амплитудным и фазовым возмущениям, а также к малым возмущениям среды».

Заключение

Исследована пространственная динамика пучка первой стоксовой компоненты ($\lambda = 650$ нм) попутного вынужденного комбинационного рассеяния (ПВКР) пикосекундных импульсов в легкой воде в вертикальной схеме при широком варьировании условий возбуждения. Показано, что динамика пространственного распределения пучка первого стока ПВКР зависит как от глубины расположения перетяжки пучка накачки относительно поверхности воды, так и от энергии ее импульсов. Показано, что на поверхности воды формируются кольцевой и осевой пучки, диаметр осевого пучка и заполнение внутренней области от оси к кольцу увеличиваются с ростом энергии импульсов накачки. При энергии импульсов накачки $E_n \geq 8$ мДж в слое $h \leq 5$ мм от поверхности происходит оптический пробой. Установлено, что при допробойной энергии импульсов ($E_n \approx 7,6$ мДж) перемещение перетяжки пучка накачки в слоях от $h = 2$ до $h = 64$ мм характеризуется обратимым переходом между однопучковой генерацией и многопучковой филаментацией ПВКР. Таким образом, формирование филаментов в воде в процессе ВКР показывает наличие в однородном пучке накачки локальных мелкомасштабных неоднородностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № Ф23РНФ-040), РНФ (грант № 23-42-10019) и ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 1.2).

Библиографические ссылки

1. Горячий лазерный термояд или низкотемпературные ядерные реакции? Анализ и перспективы первых экспериментов по лазерному синтезу / В. И. Высоцкий [и др.] // РЭНСИТ. 2021. Т. 13, №1. С. 59–70.
2. Импульсный источник заряженных частиц и нейтронов на основе 10-петаваттной лазерной системы, облучающей микрокластерную среду / Д. А. Гожев [и др.] // Квантовая электроника. 2023. Т. 53, № 3. С. 217–223.
3. Повышение эффективности термоядерной DD-реакции в фемтосекундной лазерной плазме с применением структурированных мишеней пониженной средней плотности / К. А. Иванов [и др.] // Квантовая электроника. 2020. Т. 50, № 2. С. 169–74.
4. Picosecond stimulated Raman scattering at 3000 and 3430 cm^{-1} OH vibrations without optical breakdown / S. M. Pershin [et. al.] // Optics Letters. 2020. Vol. 45, No. 19. P. 5624–5627.
5. Garmire E. Dynamics and Characteristics of the Self-trapping of Intense Light Beams / E. Garmire, R. Y. Chiao, C. H. Townes // NASA and AFCRL: Report of the Physics Department of Massachusetts Institute of Technology. 1971. N66-23765. P. 1–8.
6. Stimulated Raman scattering and nonlinear focusing of high-power laser beams propagating in water / B. Hafizi [et. al.] // Opt. Lett. 2015. Vol. 40, No.7. P. 1556-1558.
7. Femtosecond laser pulse filamentation versus optical breakdown in H₂O / W. Liu [et al.] // Applied Physics B: Lasers and Optics. 2003. No. 76. P. 215-229.
8. Чекалин С. В., Кандидов В. П. От самофокусировки световых пучков – к филаментации лазерных импульсов / УФН. 2013. Т. 183, № 2. С. 133–152.