

Основанная на обратном вынужденном комбинационном рассеянии компрессия пикосекундных импульсов в легкой воде

И. А. Ходасевич¹⁾, В. А. Орлович¹⁾, А. И. Водчиц¹⁾, К. Д. Траскевич¹⁾,
Н. С. Новиков¹⁾, Л. Е. Батай¹⁾, С. М. Першин²⁾, М. Я. Гришин²⁾

¹⁾ *Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: v.orlovich@dragon.bas-net.by*

²⁾ *Институт общей физики РАН, Россия,
e-mail: pershin@kapella.gpi.ru*

Впервые исследована компрессия импульсов при обратном вынужденном комбинационном рассеянии (ОВКР), возбуждаемом в воде излучением второй гармоники пикосекундного (≈ 40 пс) Nd:YAG лазера. Получены на стоксовой длине волны (650 нм) импульсы с длительностью ≈ 2 пс. Обсуждены физические эффекты, ограничивающие получение в воде методом ОВКР-компрессии субпикосекундных импульсов.

Ключевые слова: ВКР-компрессия импульсов; вода; пикосекундные лазерные импульсы; обратное ВКР; оптический пробой в воде.

Compression of picosecond pulses in light water based on backward stimulated Raman scattering

I. A. Khodasevich¹⁾, V. A. Orlovich¹⁾, A. I. Vodchits¹⁾, K. D. Traskevich¹⁾,
N. S. Novikov¹⁾, L. E. Batay¹⁾, S. M. Pershin²⁾, M. Ya. Grishin²⁾

¹⁾ *B. I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus
e-mail: v.orlovich@dragon.bas-net.by*

²⁾ *Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: pershin@kapella.gpi.ru*

Pulse compression at backward stimulated Raman scattering (BSRS) excited in water by the second harmonic of a picosecond (~ 40 ps) Nd:YAG laser was studied for the first time. Pulses with a duration of ≈ 2 ps were obtained at the Stokes wavelength (650 nm). Physical effects limiting the obtaining of subpicosecond pulses in water using BSRS compression are discussed.

Keywords: SRS- compression of pulses; water; picosecond laser pulses; backward SRS; optical breakdown in water.

Введение

Эффект ВКР-компрессии нано- и пикосекундных импульсов исследован достаточно хорошо при использовании в качестве активных сред преимущественно кристаллов [1, 2] и газов [3]. Установлено, что при встречном распространении стоксова и возбуждающего ВКР лазерного импульса уменьшение длительности стоксова импульса и увеличение его мощности происходит вследствие экспоненциального усиления переднего фронта этого импульса в поле неистощенного лазерного импульса. Такой процесс реализуется при ОВКР в сфокусированных лазерных пучках накачки. Усиливаемый стоксов импульс формируется из спонтанных шумов в фокальной области линзы. Первоначальная (до усиления)

длительность этого импульса определяется длиной фокальной перетяжки, а его мощность – пространственной длиной пути усиления в ВКР-среде. В перечисленных выше и других работах достигнуто сокращение длительности стоксовых импульсов в 10–20 раз по сравнению с длительностью накачки.

В последнее десятилетие значительное внимание уделяется исследованию легкой и тяжелой воды, как нелинейно-оптической среды (см., например [4–6]). При соблюдении некоторых условий и использовании излучения пикосекундных лазеров ВКР является основным эффектом, возбуждаемым в воде. Хотя коэффициент усиления ВКР g в воде для наиболее интенсивного валентного полносимметричного колебания $\nu_1(A_1)$ с максимумом в области $\approx 3400 \text{ см}^{-1}$ достаточно мал ($g \approx 0,3 \text{ ГВт/см}$ для длины волны 532 нм [7]), однако в сфокусированных потоках пикосекундного лазерного излучения порог возбуждения ВКР легко преодолевается, а эффективность ВКР-преобразования достигает десятков процентов [5, 6]. Недавно в нашей работе [8] получено 10-кратное сокращение длительности стоксовых импульсов по сравнению с длительностями импульсов возбуждающего излучения за счет попутного ВКР-усиления стоксовой затравки в параллельном пучке накачки. Физической причиной, приводящей к компрессии импульсов, в данном случае является дисперсия воды.

Целью настоящей работы является изучение возможности компрессии стоксовых импульсов при ОВКР в воде. Актуальность такой работы обусловлена тем, что большой частотный сдвиг стока излучения относительно возбуждающего позволяет получать короткоимпульсное излучение в новых спектральных диапазонах, недоступных стандартным лазерам, генерирующим пикосекундные импульсы.

1. Экспериментальная установка

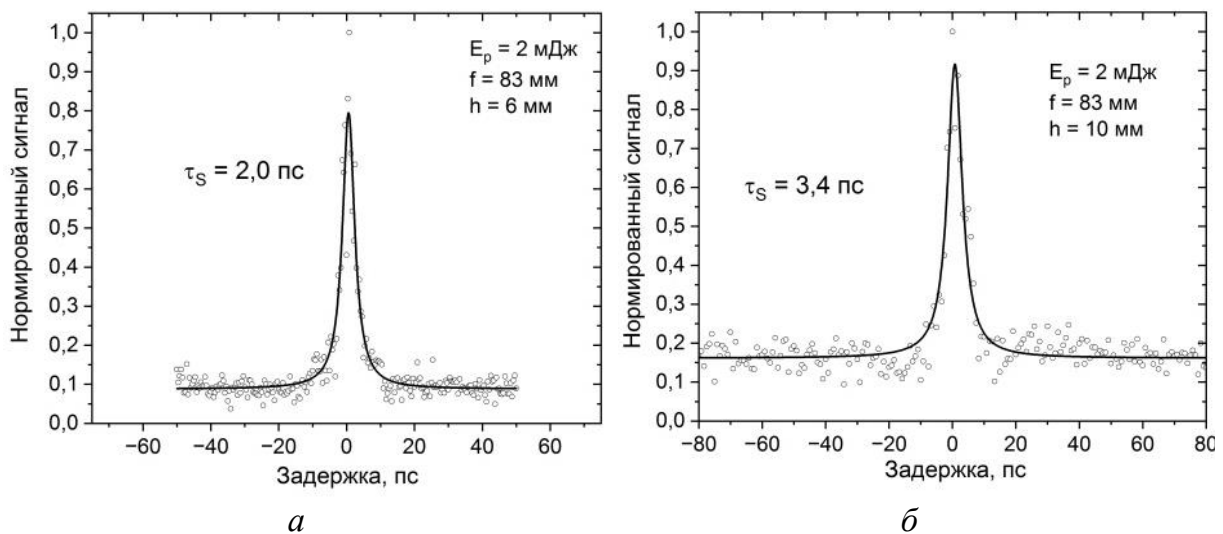
Схема экспериментальной установки подробно описана в [5, 9].

В экспериментах использовалось излучение второй гармоники пикосекундного Nd:YAG лазера (LOTIS ТП, Минск, Беларусь, модель LS2151). Длительность импульса этого лазера на основной гармонике измерялась автокоррелятором и составляла $60 \pm 5 \text{ пс}$. Поперечное распределение потока излучения было близким к гауссовому с расходимостью $\approx 0,4 \text{ мрад}$. С помощью другого автокоррелятора измерялась длительность импульсов второй гармоники, которая была равна $\approx 40 \pm 4 \text{ пс}$, а также длительность импульсов ОВКР.

Лазерное излучение на длине волны 532 нм с помощью зеркала и поворотных призм направлялось вертикально вниз и фокусировалось линзой в воду, находящуюся в кювете длиной 100 мм, через ее свободную поверхность. Фокусирующая линза могла плавно перемещаться в вертикальном направлении. Энергия импульсов ОВКР и спектр стока излучения измерялись прибором ИМО-2Н или спектрометром с разрешением $\approx 1 \text{ нм}$. Одной из причин выбора вертикальной схемы возбуждения ВКР с фокусировкой лазерного излучения через свободную поверхность воды была необходимость жесткой фокусировки излучения накачки, при которой легко повреждалось входное окно кюветы.

2. Результаты и обсуждение

При длительности импульса накачки $\tau_n \approx 40$ пс максимальный путь усиления затравочного стоксова импульса, который формируется в фокальной области фокусирующей линзы в воде, равен $L \sim \frac{\tau_n v}{2}$, где v - скорость света в воде. В нашем случае $L \sim 5$ мм. Для достижения малых длительностей затравочных стоксовых импульсов, а значит, максимального их усиления при ОВКР необходимо, чтобы длина Рэлея сфокусированного пучка накачки $L_R < L$. Поэтому в экспериментах мы использовали линзы с малым фокусным расстоянием $f = 3; 6$ и $8,3$ см. Пробные эксперименты показали, что при $f = 3$ см постоянно, а при $f = 6$ см в некоторых случаях наблюдался оптический пробой на поверхности воды с разбрызгиванием ее капель. Это обусловлено обнаруженной нами ранее особенностью поведения порога оптического пробоя воды, который в области расположения перетяжки пучка на глубине ~ 4 мм от поверхности воды резко снижается, что приводит воду в состояние пробоя или к увеличению ее турбулентности [9]. Стабильная генерация излучения ОВКР в наших условиях происходила при $f = 8,3$ см. Поэтому дальнейшие измерения проводились с использованием линзы $f = 8,3$ см. В приближении гауссового пучка накачки для $f = 8,3$ см диаметр пучка в фокусе линзы составлял ~ 26 мкм, а длина Рэлея $L_R \approx 2,5$ мм, т. е. условие $L_R < L$ было выполнено.



Примеры автокорреляционных функций стоксовых импульсов для энергии возбуждающего излучения $E_p \approx 2$ мДж (фокусное расстояние линзы 83 мм) при глубинах фокусировки: $a - h = 6$ мм; $b - h = 10$ мм

В предварительных экспериментах установлено, что длительность стоксова импульса возрастала с увеличением энергии E_p импульсов возбуждающего излучения. В нашем случае порог возбуждения ОВКР достигался при $E_p \approx 1$ мДж. Минимальное значение $\tau_s \approx 2$ пс было зарегистрировано при $E_p \approx 2$ мДж и глубине расположения центра фокальной перетяжки пучка накачки $h = 6$ мм относительно поверхности воды (рис. а). Увеличение h приводило к возрастанию длительности импульсов до $\tau_s \approx 4$ пс. Одной из возможных причин возникновения такого

возрастания τ_s может быть развитие самофокусировки пучка накачки при увеличении длины оптического пути возбуждающего излучения в воде.

В процессе проведения экспериментов измерялась также энергия стоксовых импульсов E_s при $E_p = 2$ мДж и различных значениях h . В частности, для $h = 6$ мм энергия стоксовых импульсов достигала 30 мкДж, а для $h = 8$ мм $E_s \approx 140$ мкДж. Оценки показали, что пиковая мощность стоксова излучения составляла десятки МВт, что близко к пиковой мощности импульсов возбуждающего излучения.

Заключение

Таким образом, экспериментально продемонстрировано, что при ОВКР в воде возможно уменьшение длительности стоксовых импульсов в ≈ 20 раз по сравнению с длительностью импульсов возбуждающего пикосекундного излучения. Получена генерация импульсов с длительностями ≈ 2 пс и пиковой мощностью до десятков МВт на длине волны 650 нм. Дальнейшему уменьшению τ_s препятствуют конкурирующие с ВКР эффекты оптического пробоя и самофокусировки.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект Ф23 РНФ-040), РНФ (проект №23-42-10019) и ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 1.2).

Библиографические ссылки

1. Kurbanov S. V., Losev L. L. Raman compression of picosecond microjoule laser pulses in $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ crystal // Opt. Lett. 1999. Vol. 168. P. 227-232.
2. Формирование пикосекундных импульсов при обратном ВКР / В. Б. Иванов [и др.] // Квант. электрон. 1986. Т. 13, № 4. С. 857-860.
3. Каскадная ВР-компрессия импульсов АИГ-Nd-лазера / Р. Р. Бузялис [и др.] // Квант. электрон. 1987. Т. 14, № 11. С. 2266-2268.
4. Gorelik V. S. Multifrequency SRS in light and heavy water / V. S. Gorelik, A. I. Vodchits, V. A. Orlovich // J. Russian Laser Reseach. 2015. Vol. 36, № 6. P. 500-5007.
5. Asymmetrical-cavity picosecond Raman laser at the water-air interface / S. M. Pershin [et al.] // Opt. Lett. 2019. Vol. 44, № 20. P. 5045-5048.
6. Multiple increase in the efficiency of picosecond SRS excitation by Bessel laser beams in water / I. A. Khodasevich [et al.] // JETP Lett. 2024. Vol. 119, № 2. P. 89-93.
7. Kumar V. R., Kiran P. P. Transformation of liquid water to ice VII during propagation of picosecond laser pulses: effect of wavelength and polarization // JOSA. 2016. Vol. 33, № 6. P. 1157-1168.
8. Двухцветный пикосекундный ВКР-лазер на воде в кратном сокращении длительности импульсов стоксовой компоненты в параллельном пучке / С. М. Першин [и др.] // Краткие сообщ. по физике ФИАН. 2025. № 2. С. 3-10.
9. Backward SRS suppression of ps pulses in water volume through the surface / S. M. Pershin [et al.] // Quant. Electron. 2022. Vol. 52, № 1. P. 283-288.