

## О ХАРАКТЕРЕ ПРОЦЕССОВ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

А. Ф. Бункин, М. А. Давыдов, С. М. Першин, С. Н. Федоров

*В воде, в спектре обратного вынужденного рассеяния, впервые, насколько нам известно, при фокусировке лазерного импульса наносекундной длительности “под свободную поверхность”, был зафиксирован ряд стоксовых и антистоксовых линий со сдвигом, соответствующим по величине линиям вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) в воде. Такой спектр обусловлен, на наш взгляд, нелинейным взаимодействием волн во внешнем резонаторе, образованном распределенным зеркалом и поверхностью воды.*

**Ключевые слова:** вынужденное рассеяние, порог генерации, четырехфотонное взаимодействие.

Явление вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ), сопровождающееся рядом конкурирующих нелинейных процессов, подробно изучено к настоящему времени [1]. Однако интерес к различным аспектам данного явления сохраняется, в частности, потому что его необходимо учитывать в различных областях применения импульсных лазеров [2, 3]. Целью настоящей работы было изучение характера ВРМБ вблизи поверхности в жидкости.

Принципиальная схема измерений приведена на рис. 1. Излучение импульсного лазера на  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  (TEM<sub>00</sub>, длина волны излучения  $\lambda = 0.532$  нм, максимальная энергия в импульсе  $E_{\text{имп}} \sim 3$  мДж; длительность импульса излучения  $\tau \sim 10$  нс, частота повторения импульсов 1 Гц) было направлено вертикально вниз на свободную поверхность исследуемой жидкости (бидистиллированная вода), находящейся в открытой сверху стеклянной цилиндрической кювете с внутренним диаметром 25 мм. Дно кюветы было развернуто на  $4\text{--}5^\circ$  относительно оптической оси установки. Лазерное излучение фокусировали на поверхность жидкости с помощью линзы  $f = 30$  мм (оценка параметров

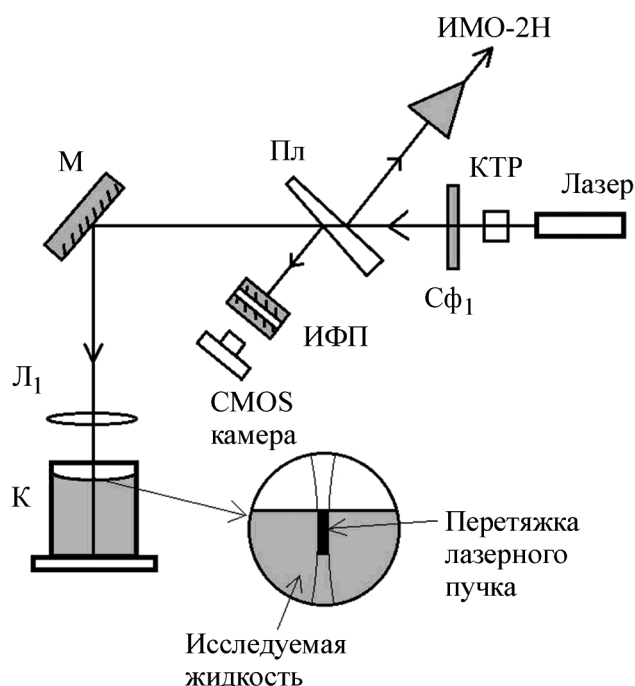


Рис. 1: Принципиальная схема эксперимента. Здесь: КТР – кристалл для удвоения частоты лазерного излучения; Сф<sub>1</sub> – светофильтр СЗС-22; ИМО-2Н – измеритель энергии лазера; Пл – клиновидная делительная пластина; ИФП – интерферометр Фабри–Перо; CMOS – камера; М – поворотное зеркало; Л<sub>1</sub> – фокусирующая линза ( $f = 30$  мм); К – кювета с исследуемой жидкостью.

пучка: диаметр перетяжки  $d \sim 3.2$  мкм, длина перетяжки  $l \sim 40$  мкм). Точную настройку лазерного пучка, падающего на свободную поверхность жидкости, производили подобно тому, как производится настройка зеркала оптического резонатора. Для исследования по глубине приповерхностного слоя жидкости кювету можно было перемещать вдоль вертикальной оси с помощью микрометрического винта с шагом 5 мкм. Спектр выходящего “назад” излучения измеряли с помощью интерферометра Фабри–Перо с областью дисперсии  $\Delta\nu = 0.625$  см<sup>-1</sup> либо  $\Delta\nu = 2.5$  см<sup>-1</sup>. Спектры фотографировали с помощью CMOS-камеры без накопления – “за один выстрел” и обрабатывали на компьютере в программной среде Labview. С помощью прибора ИМО-2Н контролировали энергию падающего излучения. Измерения проводили при комнатной температуре.

Получены следующие результаты:

1) Каустика (перетяжка лазерного пучка) полностью в воде – около 10 мм ниже поверхности – имеет место сильный сигнал ВРМБ-назад (только 1-я стоксова компонента,

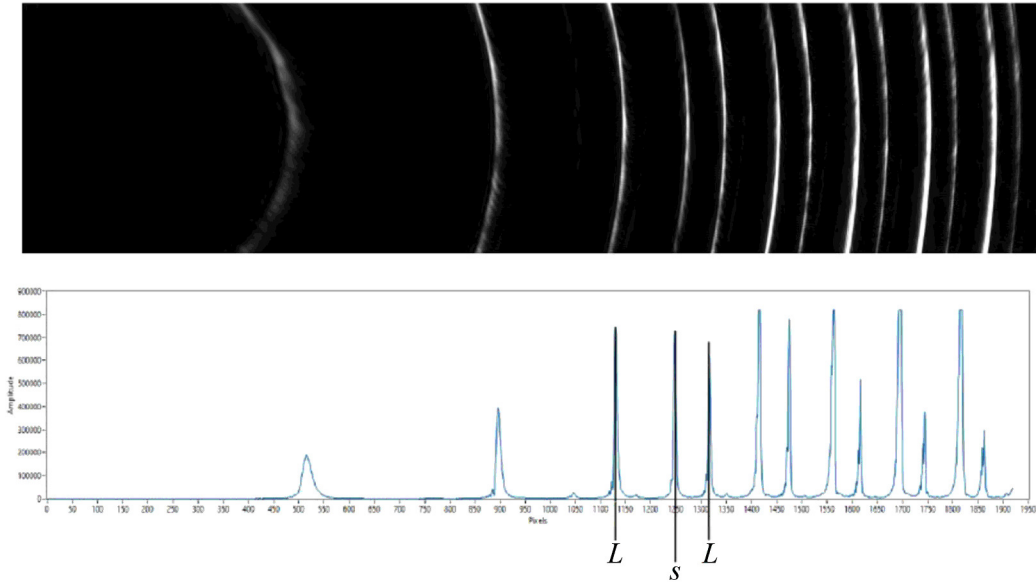


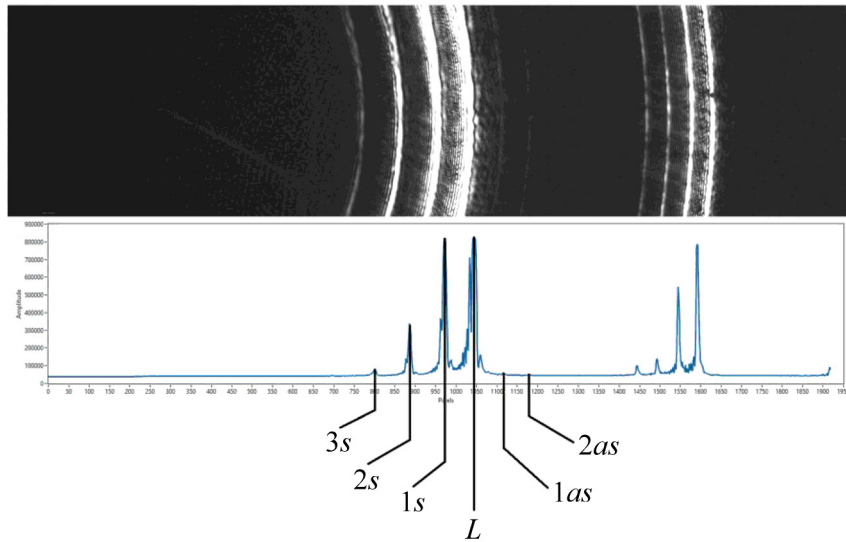
Рис. 2: Интерферограмма и денситограмма спектра вынужденного рассеяния назад. Область дисперсии интерферометра Фабри–Перо  $\Delta\nu = 0.625 \text{ см}^{-1}$ ; величина стоксова сдвига  $\Delta\nu_s \sim 0.245 \text{ см}^{-1}$ . Энергия импульса лазера  $E_{\text{имп}} \sim 0.38 \text{ мДж}$ . Здесь  $L$  – линия спектра лазерного излучения,  $s$  – линия ВРМБ.

величина сдвига  $\Delta\nu_s \sim 0.245 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует сдвигу ВРМБ в воде (рис. 2); величина порога ВРМБ в данной геометрии установки –  $E_{\text{пор}} \sim 0.38 \text{ мДж}$ ; при увеличении накачки возрастала и 1-я стоксова компонента, далее наступал пробой в фокусе.

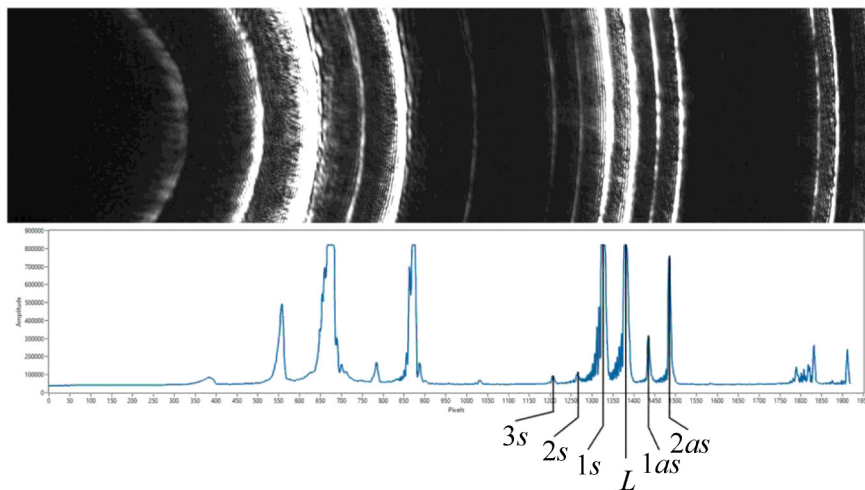
2) Каустика целиком в приповерхностном слое воды, подобно тому, как показано на врезке рис. 1 – наблюдаются одновременно до трех стоксовых и двух антистоксовых компонент, энергия лазера  $E_{\text{имп}} \sim 0.5–0.7 \text{ мДж}$  (рис. 3(а), (б)). Величина сдвига между соседними линиями  $\Delta\nu_{s,as} \sim 0.245 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует сдвигу ВРМБ в воде. При небольшой отстройке ( $\sim 10^{-3}$ ) лазерного луча от нормали к поверхности воды спектр ВРМБ был аналогичен спектру, показанному на рис. 2.

3) Каустика частично в воде, частично в воздухе над поверхностью – конкуренция между ВРМБ и пробоем, при этом иногда удается зафиксировать и пробой и слабое ВРМБ за однократный импульс лазера; диапазон искрообразования – по лимбу микрометра – около 100 мкм.

4) Каустика полностью над поверхностью воды – ВРМБ отсутствует, энергии 3 мДж для пробоя недостаточно.



(а) энергия импульса лазера  $E_{\text{имп}} \sim 0.5$  мДж



(б) энергия импульса лазера  $E_{\text{имп}} \sim 0.7$  мДж

Рис. 3: (а), (б) Интерферограммы и денситограммы спектров вынужденного рассеяния назад. Область дисперсии интерферометра Фабри–Перо  $\Delta\nu = 2.5 \text{ см}^{-1}$ ; величина сдвига между соседними линиями  $\Delta\nu_{s,as} \sim 0.245 \text{ см}^{-1}$ . Здесь  $L$  – линия спектра лазерного излучения;  $1s, 2s, 3s$  – стоксовы линии ВРМБ;  $1as, 2as$  – антистоксовы линии ВРМБ.

Результаты пп. 1 и 4 многократно наблюдали ранее. Наблюдение ВРМБ и пробоя за один лазерный импульс также наблюдали ранее: см., напр., [4]. По результатам п. 2 картина аналогична генерации нескольких стоксовых и антистоксовых компонент ВРМБ

во внешнем резонаторе, что наблюдали и обсуждали теоретически ранее [5, 6]. В этих работах указано, что данный процесс обусловлен четырехфотонным взаимодействием в нелинейной среде, помещенной в резонатор лазера [6], либо во внешний резонатор, отделенный от резонатора лазера с помощью поляризационной развязки [7]. Здесь резонатор обеспечивает положительную обратную связь, необходимую для возбуждения высших стоксовых и антистоксовых компонент. В нашем случае имеет место внешний резонатор, образованный, с одной стороны – распределенным зеркалом, расположенным в окрестности зарождения стоксова сигнала из тепловых шумов и нормальной к падающему лучу поверхностью нелинейной среды. Добротность этого резонатора оказалась достаточной для того, чтобы получить в воде 3 стоксовых и 2 антистоксовых компоненты ВРМБ при энергии лазера менее 1 мДж.

Данная работа была частично поддержана грантами РФФИ №№ 18-52-16016, 19-02-00013, 20-02-00172.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] И. Л. Фабелинский, *Молекулярное рассеяние света* (М., Наука, 1965), 512 с. DOI: 10.3367/UFNr.0089.1966071.0527.
- [2] Б. Я. Зельдович, Н. Ф. Пилипецкий, В. В. Шкунов, *Обращение волнового фронта* (М., Наука, 1985), 240 с. DOI: 10.3367/UFNr.0138.198210d.0249.
- [3] В. И. Беспалов, Г. А. Пасманик, *Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы* (М., Наука, 1986), 133 с. DOI: doi.org/10.1007/BF01034480.
- [4] Д. И. Маш, В. В. Морозов, В. С. Старунов, И. Л. Фабелинский, *Письма в ЖЭТФ* **2**, 562 (1965).
- [5] В. С. Старунов, *ДАН СССР* **179**(1), 65 (1968).
- [6] Ю. И. Кызыласов, В. С. Старунов, *Письма в ЖЭТФ* **7**, 160 (1968).
- [7] N. Goldblatt and M. Hercher, *Phys. Rev. Lett.* **20**(7), 310 (1968). DOI: doi.org/10.1103/PhysRevLett.20.310.

Поступила в редакцию 25 июня 2020 г.

После доработки 24 августа 2020 г.

Принята к публикации 25 августа 2020 г.