Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 10, с. 606 – 611

Вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна и оптический пробой воды в одном лазерном импульсе при фокусировке пучка накачки на поверхность

С. М. Першин[1], А. Ф. Бункин, М. А. Давыдов, А. Н. Фёдоров, М. Я. Гришин, П. А. Сдвиженский

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 17 сентября 2025 г.
После переработки 2 октября 2025 г.
Принята к публикации 3 октября 2025 г.

Впервые обнаружено вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна и оптический пробой в одном импульсе в слое воды (30 мм) с излучением спектральной линии водорода Hα 656.27 нм при фокусировке пучка Nd^{3+} : YAG лазера (532 нм, 10 нс, 0.4 мДж) на поверхность по нормали к ней с мощностью кратно ниже критической мощности самофокусировки 1.7 МВт в воде. При энергии лазерного импульса 0.6 мДж оптический пробой происходит перед развитием вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна, блокируя его. Эксперименты с дополнительным рядом образцов (ацетон, этанол, толуол и CCl_4) выявили наличие оптического пробоя с локализацией у поверхности, что подтверждается выбросом капли ударной волной, а также генерацией линии водорода во всех образцах, кроме CCl_4, где водород отсутствует в составе вещества. Синергетический механизм нелинейно-оптической компрессии импульса и коллапса пучка с достижением порога пробоя воды обсуждается.

DOI: 10.31857/S0370274X25110122

Предметом настоящего письма является изложение результатов экспериментального исследования нового явления нелинейной оптики – последовательного развития двух процессов в одном импульсе: вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) и низкоэнергетического пробоя при фокусировке пучка Nd^{3+} : YAG лазера (532 нм, 10 нс, 0.4 мДж,) на поверхность по нормали к ней с мощностью (0.04 МВт) ниже критической мощности самофокусировки (1.7 МВт).

Известно [1, 2], что частотный сдвиг стоксовой компоненты ВРМБ в прозрачных диэлектриках составляет несколько ГГц, что совпадает с диапазоном собственных частот колебаний вирусов [3–6]. Наличие бигармонического источника резонансного воздействия открывает новые перспективные возможности подавления активности вирусов вместо обработки СВЧ излучением [5], для которого характерно сильное поглощение в нативных условиях водных растворов. Тогда генерация гребенки ("комба") компонент относительно частоты лазера с использованием дополнительного кольцевого микрорезонатора [7] или стоксовых и антистоксовых компонент ВРМБ импульсов рубинового лазера [8] будет повышать эффективность воздействия на вирусы. Несомненно, что впервые обнаруженное нами ранее [9] увеличение числа стоксовых и антистоксовых компонент ВРМБ в воде без их усиления в лазере накачки [8] является основой для разработки перспективного многочастотного источника бигармонических пар когерентного излучения (оптической гребенки) в области прозрачности водных суспензий вирусов [4].

Оставалось неясным, будет ли достигнуто снижение порога ВРМБ и дополнительное увеличение числа компонент ВРМБ в "комбе" [9] при фокусировке пучка на поверхность воды, что являлось целью данной работы.

Принципиальная схема измерений (рис. 1) подобна использованной ранее в работе [9]. Излучение второй гармоники одночастотного импульсного лазера на Nd^{3+} : YAG (длина волны $\lambda_p = 532$ нм, ширина линии 0.005 см$^{-1}$, длительность импульса $\tau = 10$ нс, максимальная энергия $E_p \approx 3$ мДж и мощность $P \approx 0.3$ МВт, частота повторения импульсов 1 Гц, TEM_{00}) было направлено вниз на свободную поверхность исследуемой жидкости по нормали к ней. Дважды дистиллированную воду наливали в стеклянную цилиндрическую кювету с прозрачным дном оптического качества с высотой слоя 30 мм, который был плоскопараллельным, поскольку дно выставляли под прямым углом к вертикали.

Лазерное излучение фокусировали на поверхность воды линзой $f = 30$ мм в пятно диаметром 8 мкм. Для точной фокусировки перетяжки лазер-

[1]e-mail: pershin@kapella.gpi.ru

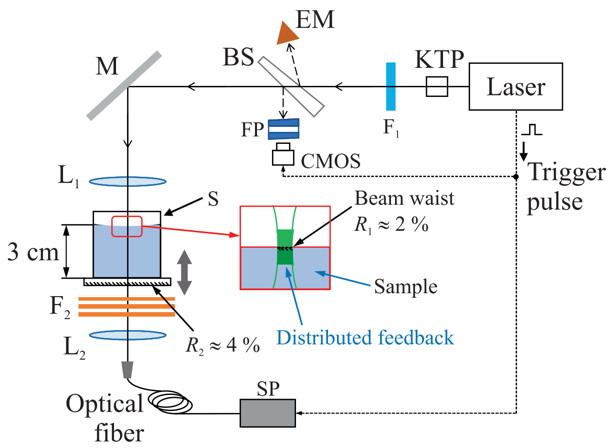

Рис. 1. (Цветной онлайн) Принципиальная схема эксперимента. Laser – одночастотный импульсный Nd^{3+} : YAG лазер; Trigger pulse – импульс синхронизации для запуска регистрации спектров; KTP – кристалл генератора второй гармоники; F_1 – светофильтр СЗС-22; EM – Energy meter, измеритель энергии лазера ИМО-2Н; BS – beamsplitter, клиновая делительная пластина; FP – интерферометр Фабри–Перо, CMOS – КМОП-камера для регистрации спектров; M – поворотное зеркало; L_1 – фокусирующая линза ($f = 30$ мм); S – кювета с исследуемой жидкостью, установленная в держателе с вертикальной микрометрической подачей; F_2 – набор светофильтров для ослабления излучения накачки; L_2 – фокусирующая линза; Optical fiber – световод для передачи излучения плазмы пробоя на входную щель спектрометра; SP – спектрометр

ного пучка на поверхность воды кювету перемещали вдоль вертикальной оси с помощью микрометрического винта. Совмещение плоскости перетяжки каустики пучка и поверхности определяли по параллельности отраженного назад пучка и прошедшего фокусирующую линзу в обратном направлении. Прошедшее через кювету "вперед" (попутно пучку накачки) излучение направляли (рис. 1) с помощью кварцевого волоконного жгута на входную щель спектрометра Oriel MS260i с ПЗС-камерой Andor DU440-BV. Спектр излучения ВРМБ "назад" (навстречу накачке) получали с помощью интерферометра Фабри–Перо с базой 8 мм (область дисперсии $\Delta\nu_1 = 0.625\,\text{см}^{-1}$). Спектральные кольца регистрировали с помощью монохромной КМОП-камеры (Basler, acA1920-40um) за один импульс лазера. Регистрация спектрограммы ВРМБ "назад" с помощью КМОП-камеры и регистрация спектра пробоя "вперед" спектрометром были синхронизированы по времени посредством синхроимпульса, который был сформирован блоком питания лазера. Изображение колец записывали в память компьютера с последующим анализом. Энергию накачки измеряли с помощью калориметра ИМО-2Н. Все измерения проводили при комнатной температуре. Порог ВРМБ измеряли по появлению колец стоксовой компоненты с известным для воды частотным сдвигом ~ 7.4 ГГц или $0.242\,\text{см}^{-1}$ [2].

Для достижения ожидаемого размножения числа стоксовых и антистоксовых компонент в "комбе" ВРМБ перетяжку пучка (плоскость геометрического фокуса с максимальной интенсивностью) совмещали с поверхностью воды (вставка на рис. 1). При этом половина каустики пучка накачки находилась под поверхностью.

Совмещение плоскости перетяжки пучка с поверхностью сопровождалось снижением порога ВРМБ до ~ 0.3 мДж от ~ 0.4 мДж, когда перетяжка находилась в объеме [9]. На рисунке 2 представлена спектрограмма ВРМБ, полученная с помощью интерферометра Фабри–Перо (рис. 2a), и ее денситограмма (рис. 2b) вдоль сечения по радиусу колец с линией стоксовой компоненты со сдвигом $0.242\,\text{см}^{-1}$ от линии накачки.

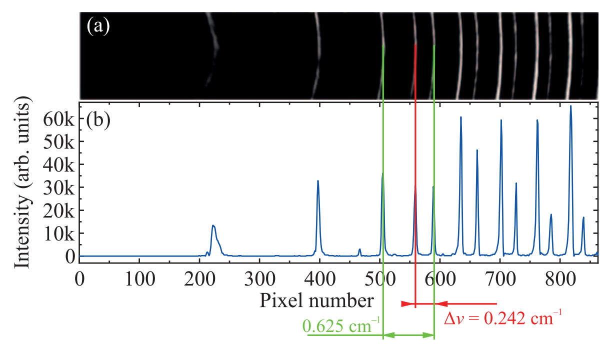

Рис. 2. (Цветной онлайн) Интерферограмма (a) и денситограмма (b) спектральных линий ВРМБ в воде при расположении перетяжки пучка на поверхности. Область дисперсии интерферометра Фабри–Перо $0.625\,\text{см}^{-1}$, сдвиг стоксовой линии ВРМБ в воде $0.242\,\text{см}^{-1}$ от линии накачки

Однако предположение об увеличении числа компонент ВРМБ в "комбе" не подтвердилось. Напротив, на следующей стадии при повышении энергии импульса накачки до 0.4 мДж была зарегистрирована стоксова компонента ВРМБ и, неожиданно, оптический пробой со звуком ударной волны, а также линией водорода Hα 656.27 нм и кислорода O I 777 нм (рис. 3).

Таким образом, впервые, насколько нам известно, получен нетривиальный результат: развитие двух процессов нелинейной оптики в одном импульсе $\tau = 10$ нс – сначала ВРМБ и, затем, низкоэнергетиче-

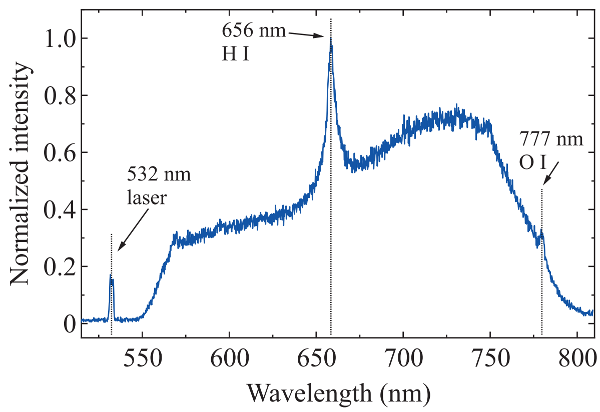

Рис. 3. (Цветной онлайн) Спектр излучения "вперед" (попутно пучку накачки) плазмы оптического пробоя воды с линией водорода Hα 656.27 нм и кислорода O I 777 нм при фокусировке пучка накачки (532 нм) на поверхность воды

ский оптический пробой при энергии 0.4 мДж. Заметим, что это значение почти на порядок меньше энергии импульса ($\sim$3 мДж), которая обеспечивала интенсивность $\sim$0.6 ТВт/см^2 и пробой в объеме воды [9] в подобной схеме эксперимента. Существенно, что мощность импульса на поверхности в нашем случае ($\sim$0.04 МВт) была в $\sim$43 раза меньше критической мощности самофокусировки ($P_{cr} = 1.7$ МВт [10]).

Следующее повышение энергии импульса накачки до 0.6 мДж сопровождалось оптическим пробоем, который происходил на фронте нарастания импульса накачки до начала развития ВРМБ и, таким образом, пробой блокировал ВРМБ. При этом плазма пробоя со спектральными линиями водорода (Hα 656.27 нм) и кислорода (O I 777 нм) инициировала ударную волну с выбросом капель воды в сторону линзы, как при пробое пикосекундными импульсами [11].

Оставалось неясным, где локализован пробой – внутри воды на глубине доли-единицы миллиметров под поверхностью или на поверхности в точке геометрического фокуса, где интенсивность в фокальном пятне пучка максимальна. Выброс капель по нормали указывает на точку пробоя под поверхностью. Для уточнения локализации пробоя было выбрано несколько образцов жидкостей с водородом в составе молекул: ацетон (C_3H_6O) (хч), этанол (C_2H_5OH) ("Альфа"), толуол ($C_6H_5CH_3$) (х.ч.), а также четыреххлористый углерод (CCl_4) (х.ч.) как жидкость без водорода в молекуле. Отметим также отсутствие кислорода в молекуле толуола. Каждую кювету с открытой поверхностью образцов перемещали вертикально до совмещения поверхности с перетяжкой пучка (вставка на рис. 1) и регистрировали спектр плазмы пробоя (рис. 4) при энергии импульса накачки 0.6 мДж.

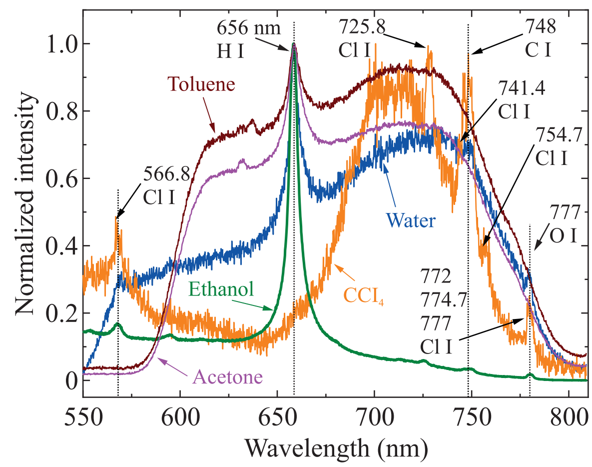

Рис. 4. (Цветной онлайн) Спектр излучения плазмы оптического пробоя, нормированный в окрестности линии Бальмера Hα 656.27 нм водорода в воде, ацетоне, этаноле и толуоле, которые содержат водород в структурной схеме молекулы, а также в четыреххлористом углероде без водорода

Из рисунка 4 видно, что во всех образцах, кроме CCl_4, в спектре излучения плазмы пробоя регистрировали линию водорода Hα 656.27 нм. Кроме того, в спектре плазмы пробоя есть и другие линии: углерода (C I 567, C I 725, C I 748 нм, и др.), кислорода (O I 777 нм) и хлора, например, триплет (Cl I 772, 774 и 777 нм) в спектре пробоя CCl_4, который совпадает с линией кислорода. При этом линия кислорода отсутствует в толуоле ($C_6H_5CH_3$), поскольку его нет в молекуле, а вклад от растворенного в толуоле кислорода пренебрежимо мал.

Совокупность данных показывает, что оптический пробой происходит в точке нелинейного фокуса на оси под поверхностью за геометрическим фокусом, поскольку отрыв капли по нормали обусловлен сферической ударной волной при ее воздействии на поверхность снизу, как при пробое пикосекундными импульсами [11]. Отметим здесь отличие от фокусировки в объем прозрачного диэлектрика, когда нелинейный фокус смещается от геометрического фокуса к линзе ("движущиеся фокусы" [12, 13]) с увеличением энергии импульса накачки (I_p) до экстремума и нелинейного (n_2) вклада в показатель преломления (n), а также в линзу Керра, соответственно [2, 14]:

$$n = n_0 + \Delta n = n_0 + n_2 I_p. \qquad (1)$$

Напротив, в нашем случае начальная максимальная интенсивность пучка на поверхности в линейном фокусе (в пятне перетяжки пучка) транслируется в среду. Тогда под поверхностью включается безынерционная динамическая линза Керра с вариацией показателя преломления (1). Эта линза уменьшает расходимость пучка и поддерживает интенсивность в канале с увеличением произведения интенсивности накачки на длину усиления (I_pL) в показателе экспоненты (2) из-за выхода пучка за пределы длины Рэлея (L_R) (3) нижней половины каустики (рис. 1, вставка) [2]:

$$I_s = I_0 \exp(G) = I_0 \exp(g \cdot I_p L), \tag{2}$$

$$L_R = (\pi \cdot w_0^2)/\lambda, \tag{3}$$

где $w_0 = 4$ мкм – радиус пучка в перетяжке, λ – длина волны.

Этот механизм работает при любой интенсивности (1) и мощности, например, ниже критической мощности (P_{cr}) самофокусировки. Именно этот механизм обеспечивает нам генерацию ВРМБ-лазера (рис. 2) при энергии импульса накачки 0.3 мДж в первой серии экспериментов без оптического пробоя. Здесь сохранение величины инкремента $G = g \cdot I_pL \approx 25$ (2) ($e^{25} \approx 10^{11}$) при снижении энергии с 0.4 мДж в объеме до 0.3 мДж (и, соответственно, снижении интенсивности I_p) и двукратным уменьшением L до половины длины каустики (3) достигается только двух-трехкратным увеличением длины усиления. Необходимое увеличение длины усиления или короткого резонатора "поверхность–распределенная обратная связь" обеспечивается линзами Керра и уменьшением расходимости пучка под поверхностью линзой с последующем коллапсом пучка при повышении энергии накачки и аддитивном вкладе встречных волн.

Отметим также роль двух связанных резонаторов – короткого резонатора ВРМБ-лазера (с длиной, равной длине Рэлея (3) $L_R \approx 100$ мкм) под поверхностью, который входит в длинный резонатор "поверхность воды–поверхность дна кюветы" с толщиной воды 30 мм с периодом кругового обхода 267 пс в эволюции обнаруженных процессов. Существенно, что достижение порога ВРМБ сопровождается формированием стоксовой компоненты с усилением и компрессией импульса [2, 15] с повышением мощности, а также обращением волнового фронта навстречу импульсу накачки [2, 16] при отражении от дна до усиления в коротком резонаторе [9] в поле накачки с большей амплитудой импульса. При этом в короткий резонатор каждые 267 пс инжектируется часть энергии компоненты ВРМБ после почти 1000-кратного ослабления из-за коэффициентов отражения от поверхности (произведение $R_1R_2 \sim 0.001$) и дна (рис. 1), но с экспоненциальным (2) усилением на длине 30 мм в поле накачки на встречных пучках. Ранее [17, 18] подобная схема инжекции, или подкачки, тонкого резонатора с активной средой была использована нами в синхронно-накачиваемом лазере при возбуждении коротким цугом пикосекундных импульсов. Сжатие импульса и рост мощности до P_{cr} обеспечивают уменьшение расходимости и рост интенсивности в каскаде линз Керра с увеличением оптической силы в пучностях стоячих волн к нелинейному фокусу в поле нарастающего фронта импульса встречной накачки.

Вторая серия экспериментов с ВРМБ и пробоем в одном импульсе с энергией 0.4 мДж и длительностью 10 нс указывает на превышение критической мощности (P/P_{cr}) самофокусировки с последующим коллапсом пучка в точке на оси в нелинейном фокусе. Здесь пробой отражает синергетический механизм суммирования нелинейно-оптических процессов с положительной обратной связью. Так, нарастающая на ~ 5 нс фронте импульса энергия накачки при входе в среду обеспечивает максимальное усиление и компрессию импульса встречной стоксовой компоненты с обращением волнового фронта [2, 16] на финальном отрезке у поверхности с увеличением показателя экспоненты (2) и, соответственно, также рост оптической силы нелинейной динамической линзы Керра с положительным градиентом к поверхности. Отраженная поверхностью ($R_1 \approx 2\,\%$) доля компоненты суммируется с энергией импульса поступающей накачки с повышением суммарной мощности до критической мощности самофокусировки. Тогда интенсивность пучка от поверхности суммируется в нелинейном фокусе с интенсивностью встречной компоненты с коллапсом пучка из-за обращения волнового фронта. Отметим, что низкоэнергетический пробой был достигнут с энергией импульса в 7.5 раз меньше энергии 3 мДж, при которой оценка порога пробоя воды наносекундными импульсами в объеме (~ 0.6 ТВт/см^2) согласуется с измеренным ранее в других работах [19, 20]. Отсюда следует, что диаметр пучка (8 мкм) при коллапсе в нелинейном фокусе сжимается с коэффициентом $(7.5)^{1/2} \approx 2.74$ до величины ~ 2.9 мкм. Квадратичная зависимость длины самофокусировки (L_{sf}) [2, 14] от радиуса пучка (~ 4 мкм) на поверхности дает в нашем случае оценку локализации нелинейного фокуса $L_{sf} \sim 1$ мм (под поверхностью) с предположением двукратного превышения критической мощности самофокусировки ($P/P_{cr} \sim 2$). Отсюда следует, что нелинейный фокус смещается [12, 13] к короткому резонатору ВРМБ-лазера увеличенной длины из-за уменьшения расходимости пучка.

Последующее повышение энергии накачки (от 0.4 до 0.6 мДж) сопровождается ростом показателя экспоненты (2) $G = g \cdot I_p L$ с 25 до 37, а также коэффициента усиления до величины ($\exp(37) \approx 10^{16}$) в коротком резонаторе и несколько меньшего значения в длинном (30 мм) резонаторе из-за истощения накачки. Рассмотренный выше синергетический механизм будет индуцировать смещение нелинейного фокуса [14] ближе к поверхности с пробоем в окрестности резонатора ВРМБ с блокировкой проходов в нем и срыва генерации ВРМБ, что наблюдалось в эксперименте.

Отметим, что отклонение пучка накачки от нормали к поверхности при смещении фокусирующей линзы поперек пучка, которое выключало обратную связь при отражении от поверхностей низкодобротных резонаторов, сопровождалось отсутствием выявленных особенностей, а именно, сниженного порога ВРМБ и пробоя образца в одном импульсе.

Таким образом, впервые, насколько нам известно, обнаружено новое нелинейно-оптическое явление в одном наносекундном импульсе воздействия, которое зависит от энергии накачки – снижение энергии импульса для генерации ВРМБ в плоскопараллельном слое воды при фокусировке пучка на поверхность по нормали к ней с последующим пробоем с мощностью импульса, которая многократно меньше критической мощности самофокусировки. Для уточнения места локализации пробоя были проведены эксперименты с несколькими образцами жидкостей с водородом и кислородом в составе молекул и без этих элементов: ацетон (C_3H_6O), этанол (C_2H_5OH), толуол ($C_6H_5CH_3$) (без кислорода), а также четыреххлористый углерод (CCl_4) (без водорода). В спектре излучения плазмы линии водорода или кислорода отсутствовали в образцах четыреххлористого углерода и толуола соответственно. Отсюда следует, что пробой локализован в жидкости под поверхностью. Выявлен синергетический механизм самовоздействия при ВРМБ с вариацией параметров импульсов и пучков, который обеспечивает концентрацию плотности энергии почти на порядок. Весьма существенным является сжатие и коллапс пучка в точке нелинейного фокуса до низкоэнергетического пробоя в жидкости под поверхностью.

Ранее [13] при смещении перетяжки пучка к входной грани кристалла, в котором изучали ВКР фемтосекундных (~ 300 фс) импульсов, был обнаружен пробой кристалла без увеличения энергии накачки. Порог пробоя не был достигнут в объеме. Подобный низкоэнергетический пробой был зарегистрирован нами при ВКР 50-пс импульсов в воде при смещении перетяжки пучка к входной поверхности с выбросом капли и подавлением компоненты обратного ВКР [11]. Отсюда следует, что существует сходство сценария пробоя при смещении перетяжки пучка к поверхности с определяющим фактором кратного снижения энергии импульса с концентрацией и высокой локализацией плотности энергии по сравнению с пробоем в объеме, несмотря на отличие фемто-пико-наносекундной длительности импульсов, что указывает на фундаментальную природу низкоэнергетического пробоя.

С другой стороны, в работе не было обнаружено ожидаемой генерации “комба” компонент ВРМБ в воде при фокусировке пучка по нормали на поверхность из-за оптического пробоя, несмотря на снижение энергии импульса возбуждения ВРМБ. Напротив, впервые генерация трех стоксовых и двух антистоксовых компонент (“комба”) ВРМБ в воде без пробоя в такой же схеме эксперимента была обнаружена при приближении перетяжки пучка из объема к входной поверхности [11], как альтернатива генерации “комба” эквидистантных линий в работе [7]. Несомненно, реализация “комба” ВРМБ указывает на существование области оптимальных параметров (как для ВКР [13]) низкоэнергетических нелинейно-оптических синергетических процессов с включением резонатора, который обеспечивает четырехволновое взаимодействие с генерацией антистоксовых компонент. Особый интерес здесь вызывает возможность инактивации вирусов [4, 5] при резонансном бигармоническом воздействии [21], изучение которой будет продолжено.

Финансирование работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант # 23-42-10019, ссылка на информацию о проекте: https://rscf.ru/project/23-42-10019/) в части изучения оптической подкачки усиления вынужденного рассеяния в воде в коротком резонаторе с периодом обхода составного длинного резонатора как в лазере с синхронной накачкой тонкого резонатора коротким цугом импульсов.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. С. А. Ахманов, Р. В. Хохлов, *Проблемы нелинейной оптики*, Наука, М. (1964).

2. R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*, 3rd ed., Academic Press, N.Y. (2008).
3. M. Sadraeian, I. Kabakova, J. Zhou, and D. Jin, Appl. Phys. Rev. **11**, 021324 (2024); https://doi.org/10.1063/5.0183276.
4. O. V. Karpova, A. D. Kudryavtseva, V. N. Lednev, T. V. Mironova, V. B. Oshurco, S. M. Pershin, E. K. Petrova, N. V. Tcherniega, and K. I. Zemskov, Laser Phys. Lett. **13**(8), 085701 (2016); https://doi.org/10.1088/1612-2011/13/8/085701.
5. V. I. Kovalev, S. M. Pershin, M. V. Arkhipenko, A. N. Fedorov, O. V. Karpova, and V. B. Oshurko, Proc. of Frontiers in Optics / Laser Science, OSA 2019, Sept 14-19; www.osa-opn.org/bio-quantum.
6. P.-J. Wang, Y.-H. Pang, S.-Y. Huang, J.-T. Fang, S.-Y. Chang, S.-R. Shih, T.-W. Huang, Y.-J. Chen, and C.-K. Sun, Sci. Rep. **12**, 12596 (2022); https://doi.org/10.1038/s41598-022-16845-5.
7. S. N. Mantsevich, E. I.Kostyleva, A. N. Danilin, D. A. Brukvina, K. N. Min'kov, and N. Yu. Dmitriev, Phys. Rev. A **111**(4), 043509 (2025); https://doi.org/10.1103/PhysRevA.111.043509
8. Ю. И. Кызыласов, В. С. Старунов, Письма в ЖЭТФ **7**, 153 (1968).
9. С. М. Першин, А. Ф. Бункин, М. А. Давыдов, А. Н. Федоров, М. Я. Гришин, Письма в ЖЭТФ **112**(7), 437 (2020) [S. M. Pershin, A. F. Bunkin, M. A. Davydov, A. N. Fedorov, and M. Ya. Grishin, JETP Lett. **112**(7), 401 (2020)]; https://doi.org/10.1134/S002136402019008X.
10. B. Hafizi, J. P. Palastro, J. R. Penano, T. G. Jones, L. A. Jonson, M. H. Helle, D. Kaganovich, Y. H. Chen, and A. B. Stamm, J. Opt. Soc. Am. B **33**(10), 2062 (2016); https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.002062.
11. С. М. Першин, А. И. Водчиц, В. А. Орлович, М. Я. Гришин, И. А. Ходасевич, Краткие сообщения по физике ФИАН **51**(3), 3 (2024) [S. M. Pershin, A. I. Vodchits, V. A. Orlovich, M. Ya. Grishin, and I. A. Khodasevich, Bull. Lebedev Phys. Inst. **51**(2), 45 (2024)]; https://doi.org/10.3103/S1068335623602169.
12. А. Л. Дышко, В. Н. Луговой, А. М. Прохоров, Письма в ЖЭТФ **6**, 655 (1967) [A. L. Dyshko, V. N. Lugovoi, and A. M. Prokhorov, JETP Lett. **6**, 146 (1967)].
13. И. О. Киняевский, А. В. Корибут, И. В. Гриценко, А. М. Сагитова, М. В. Ионин, Е. Э. Дунаева, А. А. Ионин, Оптика и спектроскопия **131**(2), 202 (2023) [I. O. Kinyaevskiy, A. V. Koribut, I. V. Gritsenko, A. M. Sagitova, M. V. Ionin, E. E. Dunaeva, and A. A. Ionin, Opt. Spectrosc. **131**(2), 191 (2023)]; https://doi.org/10.61011/EOS.2023.02.55784.6-23.
14. С. В. Чекалин, В. П. Кандидов, УФН **183**(2), 133 (2013) [S. V. Chekalin and V. P. Kandidov, Phys.-Uspekhi **56**(2), 123 (2013)]; https://doi.org/10.3367/UFNe.0183.201302b.0133.
15. H. Yoshida, T. Hatae, H. Fujita, M. Nakatsuka, and S. Kitamura, Opt. Express **17**(16), 13654 (2009); https://doi.org/10.1364/OE.17.013654.
16. Б. Я. Зельдович, Н. Ф. Пилипецкий, В. В. Шкунов, *Обращение волнового фронта*, Наука, М. (1985).
17. К. Д. Егоров, В. А. Нехаенко, С. М. Першин, С. А. Плешанов, А. А. Подшивалов, В. В. Шувалов, Квантовая электроника **13**(6), 1169 (1986) [K. D. Egorov, V. A. Nekhaenko, S. M. Pershin, S. A. Pleshanov, A. A. Podshivalov, and V. V. Shuvalov, Sov. J. Quant. Electron. **16**(6), 768 (1986)]; https://doi.org/10.1070/QE1986v016n06ABEH006894.
18. В. А. Нехаенко, С. М. Першин, А. А. Подшивалов, Квантовая электроника **13**, 453 (1986) [V. A. Nekhaenko, S. M. Pershin, and A. A. Podshivalov, Sov. J. Quant. Electron. **16**(3), 299 (1986)]; https://doi.org/10.1070/QE1986v016n03ABEH005825.
19. Z. Men, W. Fang, Z. Li, C. Sun, Zh. Li, and X. Wang, Opt. Lett. **40**(7), 1434 (2015); https://doi.org/10.1364/OL.40.001434.
20. H. Yui, Anal. Bioanal. Chem. **397**, 1181 (2010); https://doi.org/10.1007/s00216-010-3703-y.
21. M. Yr. Grishin, O. V. Karpova, M. V. Arkhipenko, S. M. Pershin, E. V. Shashkov, and G. A. Boldin, Picosecond laser induced inactivation of tobacco mosaic virus, 32nd International Conference "Advanced Laser Technologies" (ALT'25), September 22-26, 2025, Kazan. Biomedical Photonics Section 5, Book of abstracts p. 75 (oral); https://altconference.org/documents/alt25/ALT2025%20abstracts.pdf.