

ОПТИКА И ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 535.361

**ИЗМЕНЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА, ПРОШЕДШЕГО НЕЛИНЕЙНУЮ
ЖИДКУЮ СРЕДУ**

А. Ф. Бункин¹, М. А. Давыдов¹, А. Н. Федоров¹,
П. И. Орлова², Л. А. Осминкина²

При фокусировке импульсного лазерного излучения в чистые жидкости, растворы и коллоидные растворы обнаружено увеличение длительности лазерного импульса, прошедшего через кювету с образцом. Данное увеличение длительности обусловлено, вероятно, образованием отрицательной обратной связи вследствие вынужденного рассеяния.

Ключевые слова: длительность лазерного импульса, вынужденное рассеяние, коллоидный раствор наночастиц.

Введение. В последнее время значительное внимание уделяется исследованию наночастиц, в частности для применения в медицине и биологии [1]. В указанных областях наночастицы находят применение в виде коллоидных растворов (суспензий), где в качестве разбавителя используют дистиллированную воду, различные растворы электролитов и т. п. Например, в медицинских целях применяют суспензии наночастиц пористого кремния (pSi NPs) в воде, физиологическом растворе и этаноле. Сами эти жидкости обладают своими специфическими свойствами: вязкостью, диэлектрической проницаемостью, скоростью и затуханием звука разных частот и т. п. и давно и хорошо изучены [2], тогда как влияние свойств конкретного разбавителя на нелинейно-оптические свойства суспензии с наночастицами изучены, на наш взгляд, недостаточно. В частности, интерес представляет изучение динамики взаимодействия наночастиц pSi NPs с молекулами растворителя, что позволяет моделировать процесс растворения наночастиц

¹ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: sbs_michail@mail.ru.

² МГУ им. М. В. Ломоносова, физический ф-т, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

и должно отражаться на форме импульса и спектре рассеянного излучения. Вынужденное рассеяние лазерного излучения в жидкости, содержащей суспензии наночастиц, приводит к конкуренции нелинейных процессов различной природы, изменяющих форму и длительность импульса рассеянного излучения. Отметим, что, несмотря на значительное количество экспериментов по вынужденному рассеянию лазерного излучения в нанодисперсных жидкостях [см. 3 и ссылки в ней], в данный момент отсутствует информация об изменении формы импульса рассеянного и лазерного излучения в таких процессах.

Целью настоящей работы было изучение временной динамики процессов вынужденного рассеяния в коллоидах в сравнении с растворами и чистыми жидкостями.

Описание эксперимента и результаты измерений. Был проделан цикл измерений временных и амплитудных параметров вынужденного рассеяния в ряде жидкостей с хорошо известными оптическими свойствами: бидистиллированная вода, этанол¹ (и его 50% раствор с водой), CCl₄, *n*-гексан (табл. 1) [4, 5].

Т а б л и ц а 1

Параметры некоторых сред, активных к ВРМБ ($\lambda_0 = 1.06$ мкм)

Среда	n	$v_S \cdot 10^{-3}$, м/с	τ , нс	$g \cdot 10^3$, см/МВт
Метанол	1.33	1.12	3.7	13
Вода	1.33	1.49	3.4	4.8
<i>n</i> -Гексан	1.37	1.11	3.5	19
Четыреххлористый углерод	1.46	1.05	1.3	6

Примечание. Данные таблицы взяты из работы [5]; при измерениях вместо метанола был использован этанол.

Указанные жидкости были исследованы в чистом виде. Также был исследован фосфатно-солевой буферный раствор Дульбекко (DPBS), широко распространенный в исследованиях биохимического и медицинского назначения благодаря своим кислотно-щелочным свойствам, близким к физиологическому *pH* клеток. Помимо этого, были исследованы две суспензии pSi NPs в этаноле, различающиеся концентрацией – $c_1 = 0.01$ г/л и $c_2 = 0.001$ г/л. Этанол в качестве разбавителя был избран потому, что приготовленный на его основе коллоид сравнительно долго находится в стабиль-

¹Использование метанола в качестве образца нежелательно, поэтому был использован этанол.

ном состоянии, тогда как коллоид с дистиллированной водой переходит в раствор в течение суток.

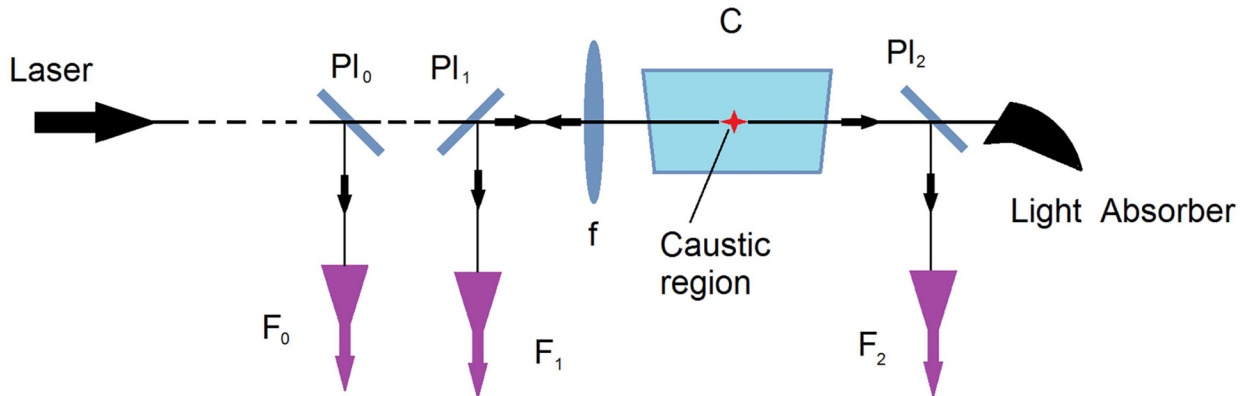


Рис. 1: Принципиальная схема измерений: *Laser* – лазер для возбуждения вынужденного рассеяния; *C* – кювета с исследуемой жидкостью; *f* – фокусирующая линза; F_0 – F_2 – фотоприемники; Pl_0 – Pl_2 – отводящие пластинки; *Caustic region* – область перетяжки лазерного пучка в середине кюветы; *Light Absorber* – поглотитель прошедшего излучения.

Измерения производили на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 1. Излучение $YAG:Nd^{3+}$ лазера (длина волны излучения $\lambda = 1.064$ мкм, TEM_{00} , длительность импульса на полувывоте $\tau_p \sim 20$ нс, энергия E_p – до 100 мДж) фокусировали линзой с $f = 50$ мм в середину кюветы C длиной $l = 40$ мм с исследуемой жидкостью. Для исключения паразитной обратной связи кювета была развернута на $\sim 2^\circ$ от оси установки и отнесена от лазера на расстояние около 6 метров. Для отведения части рассеянного “назад” и части прошедшего через кювету излучения на фотоприемники $F_{1,2}$ (модель HSA-X-S-1G4-SL) перед линзой f и после кюветы C были установлены стеклянные пластинки $Pl_{1,2}$. Фотоприемник F_0 служил для контроля лазерного излучения. С фотоприемников сигнал поступал на вход широкополосного осциллографа марки Ригол DS70 (Тайвань). Время прохождения сигналами измерительных трактов от приемников $F_{0,1,2}$ до входа осциллографа было одинаковым. Расстояния от пластинок $Pl_{1,2}$ до фотоприемников составляло около 20 см. Запуск развертки осциллографа осуществлялся от фотоприемника F_0 . С приемника F_0 сигнал на вход осциллографа поступал раньше на ~ 14 нс вследствие соответствующего расположения фотоприемника в установке. Временное разрешение измерительного тракта было не хуже 100 пс. Контроль спектрального состава лазерного и рассеянного излучения не осуществляли.

Для надежного возбуждения вынужденного рассеяния были использованы лазерные импульсы с мощностью, близкой (но меньшей!) мощности оптического пробоя в образцах. В зависимости от типа жидкости эта мощность составляла около $\sim 5\text{--}10$ МВт. Измерения проводили при единой геометрии установки и при комнатной температуре.

Было установлено:

1. Сигналы от ряда образцов – чистых жидкостей, растворов и суспензий – отличаются амплитудной и временной формой (рис. 3(a)–(г), табл. 2). Даже незначительное количество примеси в образце (например, этанол+наночастицы pSi NPs с концентрацией c_2 или раствор DPBS) существенно влияет на характер прошедшего сигнала.
2. Сигналы “назад”, полученные из бидистиллированной воды и CCl_4 , практически не имеют особенностей и по форме идентичны между собой, также как и сигналы прошедшего через кювету C “вперед” лазерного излучения, рис. 2.



Рис. 2: Осциллограмма сигналов из кюветы с бидистиллированной водой. Здесь и далее развертки имеют следующие обозначения и аналогичное расположение на экране прибора: *Laser* – контрольный сигнал излучения лазера; *“forward”* – часть излучения лазера, прошедшая через кювету с образцом; *“backscattering”* – излучение вынужденного рассеяния “назад”. Длительности импульсов измерены на полувысоте. Осциллограмма сигналов из кюветы с CCl_4 не имеет особенностей по сравнению с таковой от H_2O .

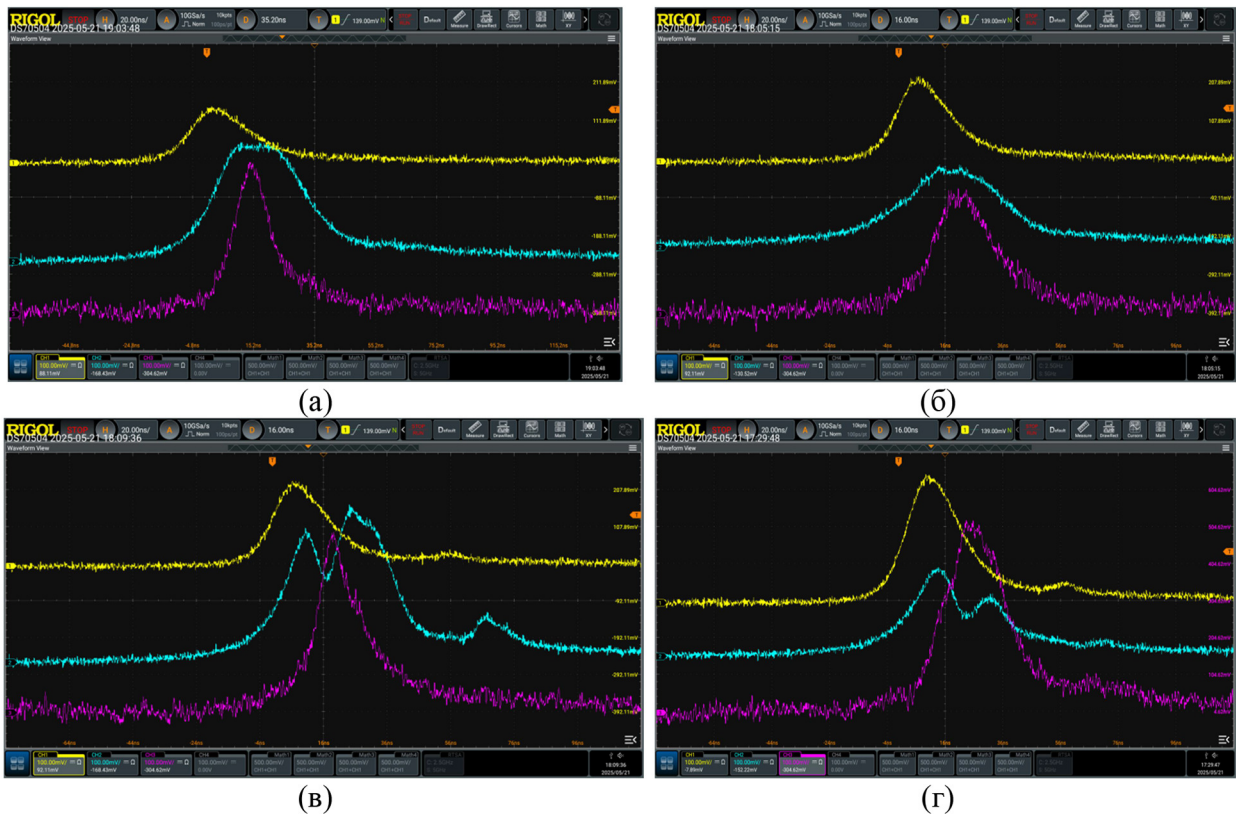


Рис. 3: Осциллограммы сигналов из образцов различных жидкостей и коллоидов: (а) фосфатно-солевой буферный раствор (DPBS); (б) коллоид этанол+наночастицы pSi NPs с концентрацией c_1 ; (в) коллоид этанол+наночастицы pSi NPs с концентрацией c_2 ; (г) чистый этанол.

Обсуждение результатов.

Особенности формы прошедшего кювету импульса. Появление “провала” на соответствующей осциллограмме обусловлено истощением лазерного импульса вследствие перекачки части его энергии в сигнал вынужденного рассеяния. Еще в ранних работах по ВРМБ ([6] и ссылки там) было указано, что временные характеристики сигнала рассеяния зависят от геометрии эксперимента и характеристик образцов. В настоящих измерениях обращает на себя внимание существенное (около 1.5 раза) увеличение длительности лазерного импульса, прошедшего (с искажениями формы) через кювету. При этом в некоторых образцах имело место и небольшое увеличение длительности импульса рассеяния “назад” (рис. 3(б), (г)), что обусловлено некоторой асимметрией временной формы возбуждающего лазерного импульса. Известны работы, где в твер-

дотельных импульсных лазерах было осуществлено увеличение длительности наносекундного импульса в разы, вплоть до микросекунд, с помощью введения в лазерный резонатор отрицательной обратной связи (ООС, например, [7]). В указанном обзоре был рассмотрен ряд вариантов: в резонатор рубинового либо неодимового лазера внедряли дополнительно нелинейный поглотитель; включали специальные режимы работы электрооптики; осуществляли удлинение импульса с помощью генерации второй гармоники или вынужденного комбинационного рассеяния в лазерном резонаторе.

Т а б л и ц а 2

Усредненные длительности прошедших через кювету (“forward”) лазерных импульсов и расстояния между первым и вторым максимумами

Порядковый №	Средняя длительность импульса “forward”, ns	Среднее расстояние между соседними “горбами” в импульсе, ns	Тип жидкости в кювете
1	33	18.8	Этанол (чистый)
2	31	19.6	Этанол/вода 50/50%
3	41	16.(3)	Этанол+pSi NPs (c_1)
4	36	15.9	Этанол+pSi NPs (c_2)
5	35	15	<i>n</i> -гексан
6	33	–	DPBS
7	22	–	CCl ₄
8	23	–	Би-H ₂ O

В настоящей работе авторы не проводили идентификацию вида нелинейного рассеяния; но, исходя из параметров установки и использованных образцов, можно допустить, что и в чистых жидкостях и в растворе наиболее вероятно осуществление вынужденного рассеяния Манделъштама–Бриллюэна (ВРМБ), либо в коллоидах – вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния (ВНКР) [8, 10]. Заметим, однако, что порог ВНКР примерно на порядок выше порога ВРМБ в одном и том же коллоиде [8, 9], а порог пробоя в коллоиде при оптимальной для возбуждения ВНКР концентрации еще выше. Сравнивая осциллограммы рис. 3 и данные в табл. 2, можно положить, что особенности прошедшего сигнала зависят от совокупности ряда параметров: времени релаксации гиперзвука, инкремента рассеяния и величины порога пробоя среды. Возможно следующее объяснение наблюдаемых временных особенностей. При фокуси-

ровке лазерного импульса в нелинейной среде в области перетяжки возбуждается соответствующая (звуковая – ВРМБ, собственных колебаний наночастиц – ВНКР) решетка либо их комбинация. Область перетяжки можно рассматривать как распределенный резонатор, где ООС – суть сигнал ВР. Отсутствие особенностей сигналов от образцов бидистиллированной воды и CCl_4 обусловлено, видимо, присущим им малым временем релаксации гиперзвука (CCl_4) и инкремента ВРМБ (H_2O).

Различие сигналов рис. 3(б) и (в) можно объяснить различным характером конкуренции процессов ВРМБ и ВНКР, обусловленным отличающимися на порядок концентрациями наночастиц кремния. Из сравнения осциллограмм рис. 3(а) и (б) следует, что, варьируя параметры нелинейной среды и лазерной накачки возможно, в определенных пределах, менять длительность лазерных импульсов при незначительном изменении их формы. Таким образом, изучение с помощью вынужденного низкочастотного рассеяния лазерного излучения динамики взаимодействия наночастиц pSi NPs с лазерным излучением в нанодисперсных суспензиях осложняется параллельным осуществлением нелинейно-оптических эффектов, которые существенно меняют длительность наносекундных импульсов вынужденного рассеяния и затрудняют прямое изучение динамики растворения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках Соглашения № 075-15-2025-455 от 26.05.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. А. Белогорлов, С. А. Бортникова, А. Г. Аюпджанов, Н. Л. Шумановский, Химико-фармацевтический журнал **54**(10), 47 (2020). DOI: 10.30906/0023-1134-2020-54-10-47-51.
- [2] *Таблицы физических величин*. Справочник под ред. И. К. Кикоина (М., Атомиздат, 1976).
- [3] М. А. Карпов, А. Д. Кудрявцева, М. А. Шевченко и др., Квантовая электроника **52**(6), 580 (2022). DOI: doi.org/10.1070/QEL18060.
- [4] А. Ф. Бункин, М. А. Давыдов, А. Н. Федоров, Л. А. Осминкина, Краткие сообщения по физике ФИАН **51**(8), 49 (2024). <https://ksf.lebedev.ru/contents.php?post=1&year=2024&number=08>.
- [5] В. И. Беспалов, Г. А. Пасманик, *Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы* (М., Наука, 1986).
- [6] В. С. Старунов, И. Л. Фабелинский, УФН **98**(3), 441 (1969). DOI: 10.3367/UFNr.0098.196907b.0441.

- [7] В. А. Арсеньев, И. Н. Матвеев, Н. Д. Устинов, Квантовая электроника 4(11), 2309 (1977). DOI: doi.org/10.1070/QE1977v007n11ABEH004118.
- [8] М. П. Жиленко, К. И. Земсков и др., В сб. “Комбинационное рассеяние – 85 лет исследований” (ИФ СО РАН, Красноярск, 2013), с. 126-135.
- [9] V. S. Gorelik, A. F. Bunkin, M. A. Davydov, et al., Appl. Phys. Lett. **117**, 141101 (2020). DOI: 10.1063/5.0024816.
- [10] V. S. Gorelik, N. V. Tcherniega, M. A. Shevchenko, et al., The Royal Society of Chemistry, 2020. DOI: 10.1039/d0sm01180k.

Поступила в редакцию 19 августа 2025 г.

После доработки 19 октября 2025 г.

Принята к публикации 20 октября 2025 г.