

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 538.958

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3668>

Нелинейно-оптические свойства дисперсных сред на основе одностенных углеродных нанотрубок при воздействии лазерного излучения с нано- и фемтосекундной длительностью импульса

П. Н. Василевский^{1,2✉}, М. С. Савельев^{1,2,3}, С.А. Терещенко^{1,2},
С. В. Селищев¹, А. Ю. Герасименко^{1,2,3}

¹Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», пл. Шокина, 1, Зеленоград, Москва 124498, Российская Федерация

²Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Ленинский пр-т, 32а, Москва 119991, Российская Федерация

³Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова, ул. Трубецкая, 8-2, Москва 119991, Российская Федерация

Аннотация

Постоянное увеличение мощностей лазерных установок и рост потенциальных областей применения лазеров делает актуальной проблему защиты чувствительных элементов электрооптических систем и органов зрения от высокоинтенсивного излучения. Современные системы способны генерировать лазерное излучение в широком диапазоне длин волн, длительностей и частот повторения импульсов. Для качественной защиты требуется использование универсального ограничителя, способного ослаблять лазерное излучение, не вызывать цветового искажения и иметь высокое значение пропускания при воздействии маломощным излучением. Для этого могут использоваться дисперсные среды на основе углеродных нанотрубок, обладающими уникальными физико-химическими свойствами. Такие среды имеют постоянные значения коэффициента поглощения и показателя преломления при воздействии низкоинтенсивным лазерным излучением и изменяют свои свойства только при достижении порогового значения.

Целью работы было исследование нелинейно-оптических свойств водной дисперсии одностенных углеродных нанотрубок при воздействии нано- и фемтосекундным излучением. Для характеристики исследуемой среды использовались методы Z-сканирования и эксперимента с фиксированным положением образца. Расчет оптических параметров выполнен с использованием пороговой модели, основанной на уравнении переноса излучения.

Показано, что водная дисперсия одностенных углеродных нанотрубок способна ограничивать излучение с длинами волн из видимого и ближнего ИК диапазонов: нано- (532, 1064 нм) и фемтосекундное (810 нм). Предложено описание нелинейно-оптических эффектов при воздействии на среды излучением с наносекундной длительностью за счет обратного насыщаемого поглощения и двухфотонного поглощения, а при воздействии фемтосекундного излучения – пространственная фазовая самомодуляция. Рассчитанные оптические параметры могут использоваться для описания поведения дисперсий углеродных нанотрубок при воздействии излучения с разной интенсивностью. Продемонстрированные эффекты позволяют сделать вывод о перспективности использования исследованных сред в качестве ограничителей высокоинтенсивного лазерного излучения в оптических системах для защиты светочувствительных элементов.

Ключевые слова: ограничители лазерного излучения, нано- и фемтосекундное излучение, углеродные нанотрубки, обратное насыщаемое поглощение, пространственная фазовая самомодуляция, Z-сканирование, уравнение переноса излучения

✉ Василевский Павел Николаевич, e-mail: pavelvasilevs@yandex.ru

© Василевский П. Н., Савельев М. С., Терещенко С. А., Селищев С. В., Герасименко А. Ю., 2021



Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации (Государственный контракт № 20411.1950192501.11.003 от 29.12.2020, идентификатор 17705596339200009540).

Для цитирования: Василевский П. Н., Савельев М. С., Терещенко С. А., Селищев С. В., Герасименко А. Ю. Нелинейно-оптические свойства дисперсных сред на основе одностенных углеродных нанотрубок при воздействии лазерного излучения с нано- и фемтосекундной длительностью импульса. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(4): 496–506. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3668>

For citation: Vasilevsky P. N., Saveliev M. S., Tereshchenko S. A., Selishchev S. V., Gerasimenko A. Yu. Nonlinear optical properties of single-walled carbon nanotubes/water dispersed media exposed to laser radiation with nano- and femtosecond pulse durations. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(4): 496–506. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3668>

1. Введение

С момента изобретения лазера в 50-х гг. лазерное излучение находит все более широкое применение в различных областях [1–3]. Аппараты для лазерной сварки и резки [4], системы фотолитографии [5], лазерные хирургические комплексы и коррекция зрения [6], спектрометры для определения химического состава веществ [7], лазерные целеуказатели и дальнометры [8] активно используются на протяжении нескольких десятилетий. В последние годы развивается направление лазерного сканирования с помощью лидаров и лазерных систем связи [9, 10].

Большая часть лазерных установок работает в видимой и ближней ИК областях излучения. Это объясняется простотой реализации как самой лазерной установки (например, Nd:YAG лазеры с генерацией дополнительных гармоник), так и фотоприемного оборудования для регистрации излучения. Кремниевые фотодиоды чувствительны в области от 200 нм до 1100 нм, что хорошо соответствует длинам волн генерации Nd:YAG лазера (1064, 532, 355 нм и т. д.) [11]. Также лазерное излучение в диапазоне 350–1100 нм слабо поглощается водой, что позволяет использовать лидары с этими длинами волн при сканировании в дождливую погоду и для батиметрии [12].

Развитие лазерной техники сопровождается увеличением мощностей используемых установок. Излучение с высокой интенсивностью может мешать работе светочувствительных детекторов и повреждать органы зрения. В соответствии с международными стандартами ANSI Z136 безопасным для глаза человека считается излучение с мощностью менее 5 мВт, если время облучения составляет не более 0.25 с. При работе с более мощным излучением необходимо использовать средства защиты.

В случае систем лазерного сканирования и дальнометрии диапазон измеряемых расстояний ограничен тем, что использование мощ-

ных лазерных импульсов может привести к перегрузке фотоприемного устройства в ближней зоне. Это связано с тем, что при уменьшении расстояния до измеряемого объекта увеличивается энергия эхо-импульса. В таких случаях для защиты фотоприемного оборудования используются оптические ограничители лазерного излучения. Однако ограничители с постоянным значением пропускания (такие как абсорбционные и интерференционные светофильтры), защищая от сильных эхо-импульсов, в той же степени ослабляют «полезный» сигнал, т. е. уменьшают верхнюю границу рабочего диапазона. Кроме того, абсорбционные светофильтры обладают спектральной избирательностью, т. е. их коэффициент ослабления зависит от длины волны падающего излучения.

Хромогенные материалы способны изменять свою оптическую плотность в зависимости от внешних параметров (температуры, прикладываемого напряжения и т. д.), но их скорость срабатывания не обеспечивает ограничение импульсов наносекундной длительности и меньше [13–15]. Поэтому потенциально наиболее пригодными средами для ограничения лазерного излучения являются нелинейно-оптические материалы.

Нелинейно-оптическими средами называются такие среды, оптические свойства которых зависят от интенсивности падающего на них лазерного излучения. Такие вещества используются для лазерной трехмерной печати [16], нелинейно-оптических переключателей [17], а также могут использоваться для ограничения интенсивности лазерного излучения [18]. При малой интенсивности I они обладают высоким пропусканием (более 70 %) и постоянными оптическими параметрами, такими как коэффициент поглощения и показатель преломления, а при достижении значения пороговой интенсивности I_{th} , начинают изменять свое пропускание за счет нелинейно-оптических эффектов (рис. 1) [19].

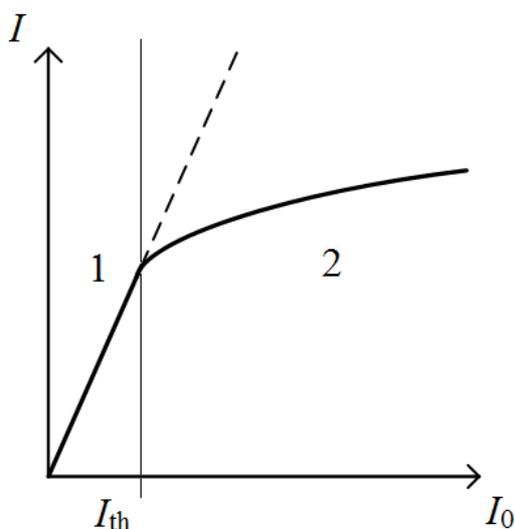


Рис. 1. Характерный вид зависимости интенсивности излучения, прошедшего через образец, от интенсивности падающего излучения. Область 1 – линейное пропускание, область 2 – нелинейное пропускание

В зависимости от типа лазерного излучения нелинейно-оптическая среда проявляет различные свойства. При воздействии импульсным наносекундным излучением с интенсивностью выше порогового значения в среде возникает нелинейное поглощение [20]. Это свойство нелинейно-оптических сред, кроме ограничения лазерного излучения, может использоваться в оптических переключателях для управления сигналом [21], а также для создания трехмерных биосовместимых конструкций для восстановления поврежденных тканей [22]. В случае длительного облучения непрерывным или фемтосекундным излучением с высокой частотой повторения импульсов происходит изменение показателя преломления, которое вызывает изменение формы луча вследствие самофокусировки или самодефокусировки [23].

Нелинейно-оптическими свойствами обладает большое количество материалов, такие как квантовые точки [24], наночастицы металлов [25], органические красители [26], а также углеродные наночастицы [27]. Углеродные наноматериалы, в отличие от красителей и металлов, обладают цветовой нейтральностью, т. е. их спектр пропускания не имеет ярко выраженных пиков поглощения. С помощью подбора концентрации можно добиться высокого линейного пропускания в видимом и ближнем ИК диапазонах. Такой ограничитель может использоваться в системах с перестраиваемой длиной волны. Одним из перспективных углеродных наноматериалов являются углеродные нанотрубки, которые, помимо оптических, обладают уникальными механическими и электропроводящими свойствами [28, 29].

Целью данной работы было исследование нелинейно-оптического отклика жидкой дисперсии одностенных углеродных нанотрубок при воздействии лазерным излучением с нано- и фемтосекундной длительностью импульса.

Для достижения поставленной цели созданы образцы водной дисперсии одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и проведены экспериментальные исследования методами Z-сканирования и эксперимента с фиксированным положением образца. Расчет нелинейно-оптических параметров, таких как нелинейный коэффициент поглощения, нелинейный показатель преломления и соответствующие им пороговые значения, позволяет произвести оценку перспектив использования исследованных сред в качестве нелинейно-оптического ограничителя.

2. Экспериментальная часть

1.1. Приготовление жидких дисперсий

Для создания исследуемого образца использованы ОУНТ с чистотой 95 %. Диаметр нанотрубок варьировался в диапазоне 1-2 нм. В качестве растворителя использовалась дистиллированная вода с $pH = 6$. ОУНТ смешивались с водой так, чтобы массовая доля ОУНТ в исходном растворе не превышала 0.005 масс. %. Исходный раствор помещался в ультразвуковой гомогенизатор Sonicator Q700 (Qsonica, США), где в течение 1 часа происходило размешивание под воздействием мощного ультразвукового поля с амплитудой 45 Вт. Затем водная дисперсия в течение 1 часа перемешивалась на магнитной мешалке.

1.2. Методы исследования линейного и нелинейного поглощения

Для определения линейного коэффициента поглощения использован однолучевой спектрофотометр Genesys 10S Uv-Vis (Thermo Fisher Scientific, США). В качестве источника излучения использовалась ксеноновая лампа, позволяющая получить спектр в ближнем УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах.

Для определения нелинейного коэффициента поглощения построена экспериментальная установка на основе Nd:YAG лазера LS-2147 (ЛОТИС ТИИ, Беларусь) (рис. 2). Для проведения исследований использовались основная

(1064 нм) и вторая гармоники (532 нм). Облучение производилось одиночными импульсами. Длительность импульса составляла 16 нс. Излучение, сгенерированное лазером (1), проходит через набор нейтральных светофильтров (2), которые необходимы для регулирования энергии излучения, попавшего на образец. Их наличие позволяет более точно подобрать необходимые для различных условий эксперимента диапазоны значений входной энергии. Призма Глана (3) необходима для проведения эксперимента с фиксированным положением образца. С её помощью производится регулировка значений энергии лазерного излучения в диапазонах, которые устанавливаются нейтральными светофильтрами (2). Регулировка значений энергии при повороте призмы Глана (3) может осуществляться только при использовании поляризованного лазерного излучения, поэтому при работе с длиной волны 1064 нм перед регулирующей призмой Глана (3) дополнительно устанавливается поляризующая призма Глана (3а), которая пропускает только линейную поляризационную составляющую. При использовании излучения с длиной волны 532 нм поляризация происходит в самом лазере в процессе генерации второй гармоники на нелинейном кристалле, поэтому нет необходимости в поляризующей призме Глана (3а).

Затем луч попадал на светоделительную пластину (4). Она отражает ~ 5 % от исходного луча на датчик (5), который снимает значения входной энергии. Линзы (6) и (8) имеют одинаковое фокусное расстояние $L = 10$ см и расположены софокусно, на расстоянии $2L = 20$ см. Из-за этого луч, сфокусированный на образец (7) линзой (6), после прохождения через линзу (8) приобретает такую же форму, как и до фокусировки. Радиус луча в перетяжке равен 25 мкм. Образец в кварцевой кювете с толщиной 2 мм помещался на моторизированную линейку, с помощью которой проводится эксперимент Z-сканирования. Затем луч попадал на датчик (9), который измерял значения выходной энергии, т. е. энергии после прохождения луча через образец.

Исследования были выполнены с использованием методик Z-сканирования и экспериментов с фиксированным положением образца. Интенсивность излучения определяется как:

$$I = \frac{2U}{\tau w^2 \pi^{3/2}}, \quad (1)$$

где U – энергия импульса, τ – длительность импульса, w – радиус луча. В случае Z-сканирования, интенсивность падающего излучения изменяет-

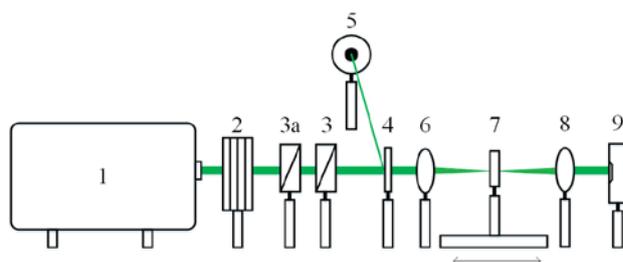


Рис. 2. Оптическая схема эксперимента для выявления нелинейно-оптического поглощения

ся за счет изменения радиуса луча. Энергия излучения остается постоянной. При проведении экспериментов с фиксированным положением образца, исследуемая среда помещается в фокус и изменяется энергия падающего излучения.

1.3. Методы исследования нелинейно-оптического преломления

Исследование нелинейного показателя преломления выполнено на базе фемтосекундного Ti:Sapphire лазера Chameleon Ultra (Coherent, США). Частота генерации импульсов составляла 80 МГц, длительность импульсов была 140 фс, длина волны – 800 нм. Линза фокусировала лазерный луч на исследуемый образец. Фокусное расстояние линзы – 10 см, радиус луча в фокусе линзы – 100 мкм. Для регистрации интерференционной картины, получаемой при фазовой пространственной самомодуляции, за образцом на расстоянии 4 см размещена CCD-камера SP620U (Ophir, Израиль). Для ограничения высокоинтенсивного лазерного излучения использовалась диафрагма, которая отсекала часть излучения при увеличении радиуса луча. Методика эксперимента аналогична эксперименту с фиксированным положением образца при воздействии наносекундным излучением. Размер диафрагмы выбран таким образом, чтобы лазерный луч полностью попадал в отверстие в отсутствие образца. Облучение проводилось при вертикальном расположении кюветы. Схема эксперимента аналогична эксперименту на наносекундном лазере, за исключением наличия диафрагмы и отсутствия второй линзы для сбора излучения.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Линейные и нелинейно-оптические свойства при воздействии наносекундным излучением

Спектр оптического линейного пропускания водной дисперсии ОУНТ в диапазоне от 300–1100 нм представлен на рис. 3. В спектре отсутствуют ярко выраженные пики, за исключением

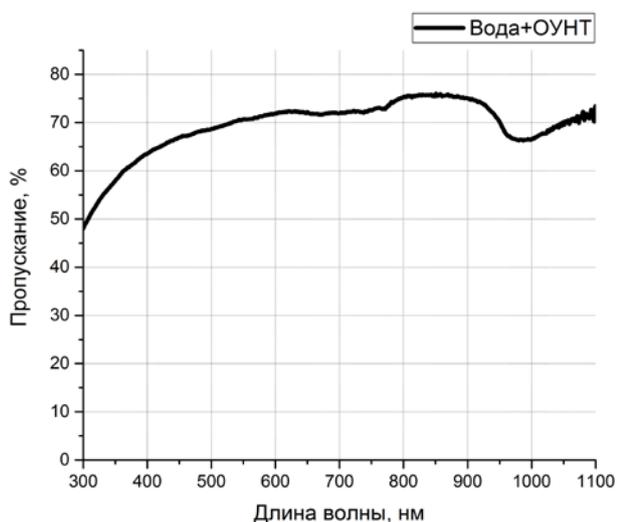


Рис. 3. Спектр оптического пропускания водной дисперсии ОУНТ

пика поглощения воды в диапазоне длин волн от 950 до 980 нм. Пропускание на длинах волн 532 и 1064 нм составляет 70 %. В экспериментах с наносекундным лазером пропускание среды при малой интенсивности излучения, когда нелинейные эффекты не регистрируются, также составляло 70 %. Это говорит о том, что исследуемая среда не обладает цветовой избирательностью, и ограничители, созданные на основе такой среды, не вызовут цветового дискомфорта при эксплуатации. Линейный коэффициент поглощения α определялся как:

$$\alpha(\lambda) = -\frac{\lg(T_{\text{lin}}(\lambda))}{d} \quad (2)$$

где $T_{\text{lin}}(\lambda)$ – линейное пропускание на определенной длине волны, d – толщина образца. В данной статье использовалась кювета с толщиной 2 мм во всех экспериментах. Для длин волн 532 и 1064 нм линейный коэффициент поглощения α равен 1.78.

Для исследования нелинейно-оптических параметров исследуемой среды при взаимодействии с импульсным наносекундным излучением кювета с водной дисперсией ОУНТ была помещена на моторизированный линейный позиционер на расстоянии 6 см от фокуса линзы и выполнен эксперимент Z-сканирования. Кювета перемещалась вдоль оптической оси распространения лазерного луча, и каждые 3 мм выполнялось облучение одиночным наносекундным импульсом. Энергия падающего излучения оставалась неизменной и составляла 550 мкДж. Таким образом, получена зависимость нормированного пропускания $T_{\text{norm}}(z)$

от положения исследуемого образца относительно фокуса линзы z , где $T_{\text{norm}}(z)$ определяется как:

$$T_{\text{norm}}(z) = \frac{T(z)}{T_{\text{lin}}}, \quad (3)$$

где $T(z)$ – значение пропускания в каждой точке z , T_{lin} – значение линейного пропускания, т. е. пропускание в отсутствие нелинейных эффектов.

Затем кювета помещалась в фокус линзы, и выполнялся эксперимент с фиксированным положением образца. По его результатам получена зависимость энергии лазерного излучения, прошедшего через образец, от энергии излучения, падающего на образец.

На рис. 4 представлены экспериментальные и теоретически рассчитанные зависимости для исследуемой водной дисперсии ОУНТ для длин волн 532 нм (рис. 4а, б) и 1064 нм (рис. 4в, г). На рис. 4а видно, что спад нормированного пропускания начинается практически сразу после начала эксперимента. Это говорит о низком значении пороговой интенсивности для исследованной среды на длине волны 532 нм. Также этим обуславливается узкая зона линейного поглощения на рис. 4б. Также можно отметить, что в представленных зависимостях отсутствуют «выбивающие» точки, которые не соответствуют общей зависимости. Это говорит о высокой стабильности дисперсии, т. е. в ней отсутствуют крупные агломераты ОУНТ, которые могли способствовать резкому изменению энергии прошедшего излучения и вызвать неправильную работу ограничителя. Также значения пропускания после прохождения фокуса соответствуют значениям пропускания до фокуса на аналогичных расстояниях. Это показывает, что в среде не произошло изменений (сваривание отдельных нанотрубок и выпадение осадка, сублимация ОУНТ, образование микропузырьков растворителя и т. п.) при прохождении через фокус линзы, т. е. через область высокой интенсивности.

При импульсном облучении дисперсии ОУНТ на длине волны 1064 нм наблюдалась схожая картина. При приближении кюветы к фокусу линзы наблюдается уменьшение нормированного пропускания и затем восстановление оптических свойств при удалении от фокуса. На рис. 4в хорошо видна область линейного поглощения, когда пропускания среды не изменяется.

Возникновение нелинейного поглощения и соответствующее изменение характеристик среды может быть описано с помощью механизма обратного насыщаемого поглощения и диаграмм

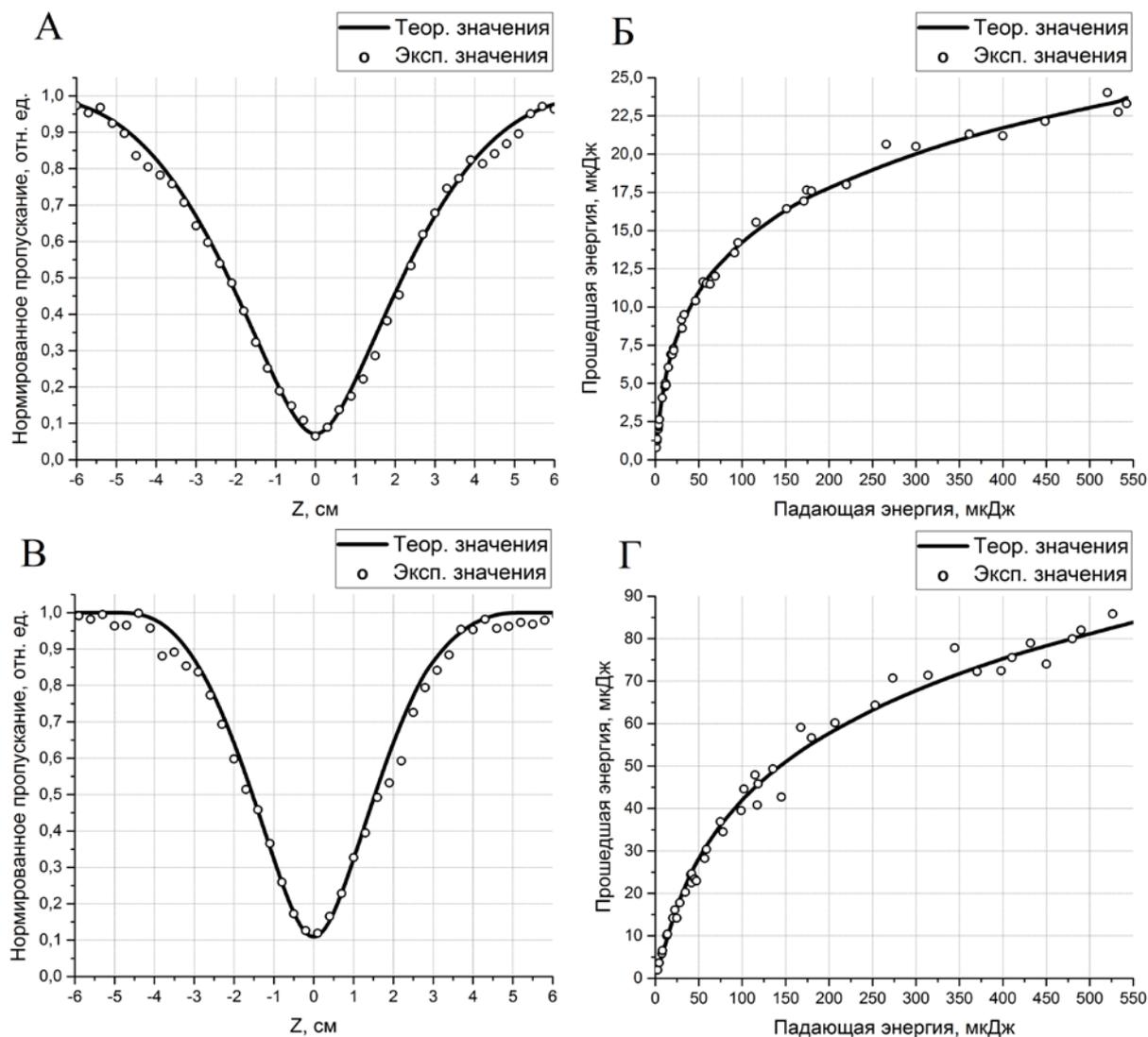


Рис. 4. Графики зависимостей, полученных по результатам Z-сканирования и эксперимента с фиксированным положением образца для длин волн 532 (а, б) и 1064 нм (в, г)

мы Яблонского [30]. При низкой интенсивности лазерного излучения поглощение фотонов вызывает возбуждение молекул с основного уровня до первого возбужденного уровня и описывается законом Бугера–Ламберта–Бэра. При повышении интенсивности первый возбужденный уровень становится практически полностью заселенным и, тогда поглощение описывается переходом из первого во второе возбужденное состояние, т. е. приобретает нелинейный характер.

По результатам экспериментов для водной дисперсии ОУНТ рассчитаны нелинейно-оптические параметры. Расчет нелинейно-оптических параметров осуществлен с помощью пороговой модели, основанной на уравнении переноса излучения [31]. Данная модель позволяет учитывать тот факт, что изменение параметров среды возникают не сразу, а только при

достижении определенного значения интенсивности:

$$\mu(I) = \alpha + \beta \cdot (I - I_{th}) \cdot \eta(I - I_{th}), \tag{4}$$

где $\mu(I)$ – полный коэффициент поглощения, β – нелинейный коэффициент поглощения, $\eta(I - I_{th})$ – функция Хевисайда. Таким образом, рассчитав оптические параметры, представленные в формуле (4), можно предсказать поведение среды при различных интенсивностях. Подробно пороговая модель описана в работах [32].

Результаты расчета представлены в табл. 1. Разница в пороговой интенсивности может быть объяснена двухфотонным поглощением. Несмотря на то, что этот эффект является беспороговым, он влияет на степень поглощения излучения в дополнение к поглощению по линейной зависимости. По этой причине на границе раздела

твёрдой и жидкой фазы может происходить образование газа значительно раньше, что проявляется в образовании микропузырей и соответственно усилению поглощения при увеличении оптического пути лазерного луча из-за многократного рассеяния [33]. Несмотря на большой коэффициент нелинейного поглощения, коэффициент ослабления на длине волны 1064 нм получен меньше, чем на длине волны 532 нм. Это происходит за счет более позднего возникновения нелинейного поглощения из-за большей пороговой интенсивности. Значения нелинейного коэффициента поглощения для дисперсии ОУНТ значительно выше значений для дисперсий частиц графена и оксида графена (3 и 45 см/ГВт соответственно), представленных в работах [34, 35]. Это может объяснено тем, что углеродные нанотрубки сильнее увеличивают многократное рассеяние, увеличивая оптический путь внутри образца. За счет увеличения оптического пути больше фотонов поглощается, что вызывает большее возбуждение молекул и, соответственно, более сильные нелинейные свойства.

3.2. Линейные и нелинейно-оптические свойства при воздействии фемтосекундным излучением

Облучение фемтосекундным излучением производилось в частотном режиме с частотой повторения импульсов 80 МГц. Кювета помещалась в фокус линзы. В табл. 2 представлены изображения с CCD камеры при различной мощности лазерного излучения. При малой мощности излучения прошедший луч соответствует гауссовой форме падающего луча. Видно, что при мощности излучения $P \approx 100$ мВт лазерный луч начинает существенно расширяться. Повышение мощности приводит к дальнейшему расширению луча с образованием кольцевидной структуры. При образовании колец в качестве размера луча взят радиус внешнего кольца. Стоит отметить, что пропускание образца в этом в этом случае не изменялось при увеличении мощности.

Возникновение такой дифракционной картины является следствием пространственной фазовой самомодуляции [36]. В среде под дейст-

вием лазерного излучения выше определенного порога начинает изменяться показатель преломления n за счет термических эффектов. При этом из-за гауссовой формы падающего излучения в разных точках среды изменение показателя преломления будет различным, образуя градиент показателя преломления. Это приводит к возникновению эффекта самодефокусировки, т. е. расхождению луча и увеличению его радиуса.

Вместе с этим в среде происходит изменение фазы когерентного лазерного излучения, так как градиентное изменение показателя преломления приводит к изменению скорости распространения луча в среде v :

$$v = \frac{c}{n}, \tag{5}$$

где c – скорость распространения луча в вакууме. Таким образом, разные части прошедшего излучения имеют разную фазу, что приводит к появлению интерференционной картины на экране. Темные области соответствуют излучению, находящемуся в противофазе, а светлые – интерференционным максимумам.

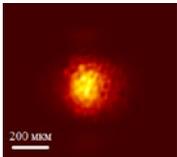
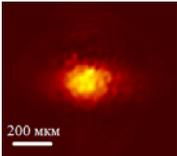
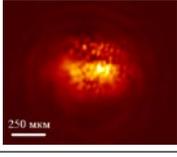
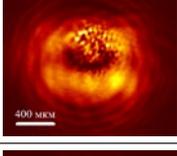
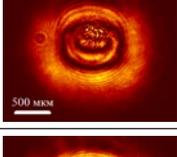
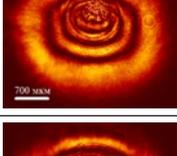
Термическая природа данного эффекта подтверждается тем, что на изображениях наблюдается искажение интерференционной картины. Кольца выше центра места облучения сужаются, образуя асимметричность по оси Y. Это связано с появлением тепловой конвекции из-за вертикального положения кюветы. При нагреве жидкости тепло уходит вверх, и температурный градиент, а вместе с ним и градиент показателя преломления, становится меньше в верхней части облучаемой зоны. Это приводит к тому, что выше центра облучения луч распространяется с приблизительно одинаковой скоростью, и сдвиг по фазе становится значительно меньше, чем ниже центр облучения или по краям.

В нашей работе предлагается использование эффекта пространственной фазовой самомодуляции для ослабления мощности излучения, прошедшего через исследуемую среду. Для этого предлагается система с диафрагмой, которая отсекает часть излучения при расширении луча. На рис. 5 представлена зависимость прошедшей мощности лазерного излучения от падающей

Таблица 1. Оптические параметры водной дисперсии ОУНТ на разных длинах волн

Длина волны, нм	Линейный коэффициент поглощения, 1/см	Нелинейный коэффициент поглощения, см/ГВт	Пороговая интенсивность, МВт/см ²	Коэффициент ослабления
532	1.78	1111	5.5	15.3
1064	1.78	2010	18	9.7

Таблица 2. Форма и размеры луча после прохождения через образец при различной мощности

№	Визуализация луча с CCD камеры	Мощность, мВт	Размер луча по X, мкм	Размер луча по Y, мкм
1		10	280	280
2		45	270	220
3		100	500	300
4		160	1020	700
5		330	1880	1450
6		520	2700	2050
7		710	3600	2700

мощности. Видно, что при достижении значения мощности $P = 150$ мВт происходит резкий спад прошедшей мощности, связанный с тем, что размер луча становится больше размеров диафрагмы, и часть луча срезается. При дальнейшем увеличении мощности прошедшая мощность перестает падать и снова начинает медленно возрастать, однако этот рост значительно меньше, чем в линейном случае, т. е. до возникновения градиента показателя преломления и расширения луча. За счет такого перехода от постоянного коэффициента пропускания к нелинейному пропусканию возникает эффект ограничения мощности лазерного излучения, который может использоваться как для защиты светочувствитель-

ных элементов, так и для управления сигналом в оптических переключателях.

Значение линейного показателя преломления n_0 получено с использованием портативного рефрактометра. Для исследуемой дисперсии он составил 1.33 и равен показателю преломления воды. Это говорит о том, что добавление углеродных нанотрубок не приводит к изменению показателя преломления растворителя.

По результатам эксперимент определен нелинейный показатель преломления n_2 в соответствии с формулой:

$$n_2 = \frac{\lambda N}{2n_0 dI} = \frac{\lambda N w_0^2 \pi}{4n_0 dP}, \tag{6}$$

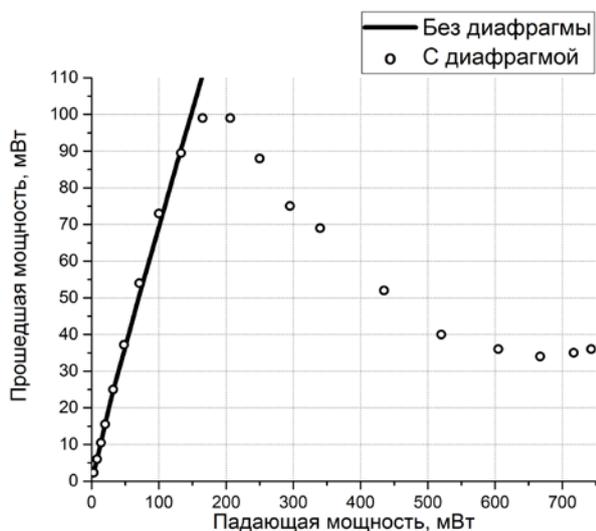


Рис. 5. График зависимости прошедшей мощности от падающей при воздействии фемтосекундным излучением

где N – количество колец. Для расчета количества колец считалось ниже центра облучения. Получено, что для исследуемого образца водной дисперсии ОУНТ нелинейный показатель преломления составил $0.16 \text{ см}^2/\text{МВт}$, что на несколько порядков больше значения нелинейного показателя преломления дисперсии графена ($0.0025 \text{ см}^2/\text{МВт}$), полученного в работе [37]. Более сильный нелинейный отклик потенциально приводит к большему увеличению радиуса колец, и, таким образом, более резкому спаду пропускания при использовании диафрагмы.

4. Выводы

В результате выполненных исследований были определены линейные и нелинейные оптические параметры для водной дисперсии ОУНТ на разных длинах волн. Полученные значения могут быть использованы для характеристики исследованной среды при взаимодействии излучением различной интенсивности. Определены условия возникновения в среде эффектов нелинейного поглощения и преломления, приводящих к изменению соответствующих оптических характеристик. Показана высокая стабильность исследуемой среды к воздействию высокоинтенсивного лазерного излучения. При воздействии лазерным излучением с нано- и фемтосекундной длительностью импульса в исследованной среде возникают эффекты нелинейного поглощения (обратное насыщаемое и двухфотонное поглощение) и нелинейного преломления (пространственная фазовая самомодуляция) соответственно. Высокое линейное пропускание и рассчитанные нелинейно-

оптические параметры позволяют сделать вывод, что водная дисперсия ОУНТ может быть использована для ограничения как единичных импульсов, так и излучения с высокой частотой повторения импульсов в видимом и ближнем ИК диапазоне длин волн. Таким образом, одностенные углеродные нанотрубки имеют высокий потенциал для использования в качестве активной среды ограничителей лазерного излучения для защиты светочувствительных датчиков и органов зрения.

Заявленный вклад авторов

Василевский П. Н. – написание текста, получение данных для анализа, итоговые выводы. Савельев М. С. – анализ экспериментальных данных, развитие методологии, редактирование текста. Терещенко С. А. – создание теоретической модели, редактирование текста. Селищев С. В. – концепция исследования, редактирование текста. Герасименко А. Ю. – научное руководство, редактирование текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Shin Y. C., Wu B., Lei S., Cheng G. J., Lawrence Yao Y. Overview of laser applications in manufacturing and materials processing in recent years. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020;142(11): 110818. <https://doi.org/10.1115/1.4048397>
2. Kalisky Y. Y., Kalisky O. The status of high-power lasers and their applications in the battlefield. *Optical Engineering*. 2010;49(9): 091003. <https://doi.org/10.1117/1.3484954>
3. Nishizawa N. Ultrashort pulse fiber lasers and their applications. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2014;53(9): 090101. <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.090101>
4. Kashaev N., Ventzke V., Çam G. Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;36: 571–600. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.10.005>
5. Liaros N., Fourkas J. T. Ten years of two-color photolithography. *Optical Materials Express*. 2019;9(7): 3006–3020. <https://doi.org/10.1364/OME.9.003006>
6. Roberts H. W., Day A. C., O'Brart D. P. S. Femtosecond laser-assisted cataract surgery: a review. *European Journal of Ophthalmology*. 2020;30(3): 417–429. <https://doi.org/10.1177/1120672119893291>
7. Campbell P., Moore I. D., Pearson M. R. Laser spectroscopy for nuclear structure physics. *Progress in*

- Particle and Nuclear Physics*. 2016;86: 127–180. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2015.09.003>
8. Dekan M., František D., Andrej B., Jozef R., Dávid R., Josip M. Moving obstacles detection based on laser range finder measurements. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2018;15(1): 1–18. <https://doi.org/10.1177/1729881417748132>
 9. Bukin O. A., Babii M. Yu., Golik S. S., Il'in A. A., Kabanov A. M., Kolesnikov A. V., Kulchin Yu. N., Lisitsa V. V., Matvienko G. G., Oshlakov V. K., Shmirko K. A. Lidar sensing of the atmosphere with gigawatt laser pulses of femtosecond duration. *Quantum Electronics*. 2014;44(6): 563–569. <https://doi.org/10.1070/QE2014v044n06ABEH015431>
 10. Goodin C., Carruth D., Doude M., Hudson C. Predicting the influence of rain on LIDAR in ADAS. *Electronics*. 2019;8(1): 89. <https://doi.org/10.3390/electronics8010089>
 11. Farid N., Li C., Wang H., Ding H. Laser-induced breakdown spectroscopic characterization of tungsten plasma using the first, second, and third harmonics of an Nd: YAG laser. *Journal of Nuclear Materials*. 2013;433(1-3): 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.09.002>
 12. Saylam K., Hupp J. R., Averett A. R., Gutelius W. F., Gelhar B. W. Airborne lidar bathymetry: assessing quality assurance and quality control methods with Leica Chiroptera examples. *International Journal of Remote Sensing*. 2018;39(8): 2518–2542. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1430916>
 13. Chomicki D., Kharchenko O., Skowronski L., Kowalonek J., Smokal V., Krupka O., Derkowska-Zielinska B. Influence of methyl group in a quinoline moiety on optical and light-induced properties of side-chain azo-polymers. *Applied Nanoscience*. 2021: 1–9. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01764-0>
 14. Büyükeksi S. I., Karatay A., Orman E. B., Selçuki N. A., Özkaya A. R., Salih B., Elmali A., Şengül A. A novel AB₃-type trimeric zinc (ii)-phthalocyanine as an electrochromic and optical limiting material. *Dalton Transactions*. 2020;49(40): 14068–14080. <https://doi.org/10.1039/D0DT02460K>
 15. Beverina L., Pagani G. A., Sassi M. Multichromophoric electrochromic polymers: colour tuning of conjugated polymers through the side chain functionalization approach. *Chemical Communications*. 2014;50(41): 5413–5430. <https://doi.org/10.1039/C4CC00163J>
 16. Savelyev M. S., Gerasimenko A. Y., Vasilevsky P. N., Fedorova Y. O., Groth T., Ten G. N., Telyshev D. V. Spectral analysis combined with nonlinear optical measurement of laser printed biopolymer composites comprising chitosan/SWCNT. *Analytical biochemistry*. 2020;598: 113710. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2020.113710>
 17. Eevon C., Halimah M. K., Zakaria A., Azurahanim C. A. C., Azlan M. N., Faznny M. F. Linear and nonlinear optical properties of Gd³⁺ doped zinc borotellurite glasses for all-optical switching applications. *Results in Physics*. 2016;6: 761–766. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.10.010>
 18. Varma S. J., Kumar, J., Liu, Y., Layne, K., Wu, J., Liang, C., Nakanishi Y., Aliyan A. Yang W. Ajayan P. M., Thomas J. 2D TiS₂ layers: a superior nonlinear optical limiting material. *Advanced Optical Materials*. 2017;5(24): 1700713. <https://doi.org/10.1002/adom.201700713>
 19. Tutt L. W., Boggess T. F. A review of optical limiting mechanisms and devices using organics, fullerenes, semiconductors and other materials. *Progress in Quantum Electronics*. 1993;17(4): 299–338. [https://doi.org/10.1016/0079-6727\(93\)90004-S](https://doi.org/10.1016/0079-6727(93)90004-S)
 20. Li R., Dong N., Ren F., Amekura H., Wang J., Chen F. Nonlinear absorption response correlated to embedded Ag nanoparticles in BGO single crystal: from two-photon to three-photon absorption. *Scientific Reports*. 2018;8(1): 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20446-6>
 21. Miao R., Hu Y., Ouyang H., Tang Y., Zhang C., You J., Zheng X., Xu Z., Cheng X., Jiang T. A polarized nonlinear optical response in a topological insulator Bi₂Se₃-Au nanoantenna hybrid-structure for all-optical switching. *Nanoscale*. 2019;11(31): 14598–14606. <https://doi.org/10.1039/C9NR02616A>
 22. Savelyev M. S., Vasilevsky P. N., Gerasimenko A. Y., Ichkitidze L. P., Podgaetsky V. M., Selishchev S. V. Nonlinear optical characteristics of albumin and collagen dispersions with single-walled carbon nanotubes. *Materials Physics and Mechanics*. 2018;37(2): 133–139. https://doi.org/10.18720/mpm.3722018_4
 23. Савотченко С. Е. Периодические состояния вблизи плоского дефекта с нелинейным откликом, разделяющего нелинейный самофокусирующий и линейный кристаллы. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2018;20(2): 255–262. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2018.20/517>
 24. Valligatla S., Haldar K. K., Patra A., Desai N. R. Nonlinear optical switching and optical limiting in colloidal CdSe quantum dots investigated by nanosecond Z-scan measurement. *Optics & Laser Technology*. 2016;84: 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.05.009>
 25. Zhang Y., Wang Y. Nonlinear optical properties of metal nanoparticles: a review. *RSC Advances*. 2017;7(71): 45129–45144. <https://doi.org/10.1039/C7RA07551K>
 26. Kuzmina E. A., Dubinina T. V., Vasilevsky P. N., Saveliev M. S., Gerasimenko A. Y., Borisova N. E., Tomilova L. G. Novel octabromo-substituted lanthanide (III) phthalocyanines—Prospective compounds for nonlinear optics. *Dyes and Pigments*. 2021;185: 108871. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108871>
 27. Papagiannouli I., Bourlinos A. B., Bakandritsos A., Couris S. Nonlinear optical properties of colloidal carbon nanoparticles: nanodiamonds and car-

bon dots. *RSC Advances*. 2014;4(76): 40152–40160. <https://doi.org/10.1039/C4RA04714A>

28. Герасименко А. Ю. Лазерное структурирование ансамбля углеродных нанотрубок для создания биосовместимых упорядоченных композиционных материалов. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2017;19(4): 489–501. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2017.19/227>

29. Атлуханова Л. Б., Долбин И. В., Козлов Г. В. Физические основы межфазной адгезии полимерная матрица – углеродные нанотрубки (нановолокна) нанокомпозитов. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020;22(2): 190–196. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2822>

30. Maurya S. K., Rout A., Ganeev R. A., Guo C. Effect of size on the saturable absorption and reverse saturable absorption in silver nanoparticle and ultrafast dynamics at 400 nm. *Journal of Nanomaterials*. 2019;2019: 1–13. <https://doi.org/10.1155/2019/9686913>

31. Tereshchenko S. A., Podgaetskii V. M., Gerasimenko A. Yu., Savelyev M. S. Threshold effect under nonlinear limitation of the intensity of high-power light. *Quantum Electronics*. 2015;45(4): 315–320. <https://doi.org/10.1070/QE2015v045n04ABEH015569>

32. Tereshchenko S. A., Savelyev M. S., Podgaetsky V. M., Gerasimenko A. Yu., Selishchev S. V. Nonlinear threshold effect in the Z-scan method of characterizing limiters for high-intensity laser light. *Journal of Applied Physics*. 2016;120(9): 093109. <https://doi.org/10.1063/1.4962199>

33. Savelyev M. S., Gerasimenko A. Y., Podgaetskii V. M., Tereshchenko S. A., Selishchev S. V., Tolbin A. Y. Conjugates of thermally stable phthalocyanine J-type dimers with single-walled carbon nanotubes for enhanced optical limiting applications. *Optics & Laser Technology*. 2019;117: 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.04.036>

34. Tong Q., Wang Y. H., Yu X. X., Wang B., Liang Z., Tang M., Wu A. S., Zhang H. J., Liang F., Xie Y. F. Nonlinear optical and multi-photon absorption properties in graphene–ZnO nanocomposites. *Nanotechnology*. 2018;29(16): 165706. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aaac13>

35. Wang S., Dong Y., He C., Gao Y., Jia N., Chen Z., Song W. The role of sp²/sp³ hybrid carbon regulation in the nonlinear optical properties of graphene oxide materials. *RSC Advances*. 2017;7(84): 53643–53652. <https://doi.org/10.1039/C7RA10505C>

36. Li J., Zhang Z., Yi J., Miao L., Huang J., Zhang J., He Y., Huang B., Zhao C., Zou Y., Wen S. Broadband spatial self-phase modulation and ultrafast response of MXene Ti₃C₂T_x (T= O, OH or F). *Nanophotonics*. 2020;9(8): 2415–2424. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0469>

37. Stavrou M., Dalamaras I., Karampitsos N., Couris S. Determination of the nonlinear optical properties of single- and few-layered graphene dispersions under femtosecond laser excitation: electronic and

thermal origin contributions. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2020;124(49): 27241–27249. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c09959>

Информация об авторах

Василевский Павел Николаевич, аспирант, инженер института биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Зеленоград, Москва, Российская Федерация; м. н. с., Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Москва, Российская Федерация; e-mail: pavelvasilevs@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5733-8497>.

Савельев Михаил Сергеевич, к. ф.-м. н., доцент института биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Зеленоград, Москва, Российская Федерация; с. н. с., Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Москва, Российская Федерация; с. н. с., Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова, Москва, Российская Федерация; e-mail: savelyev@bms.zone. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1255-0686>.

Терещенко Сергей Андреевич, д. ф.-м. н., профессор института биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Зеленоград, Москва, Российская Федерация; с. н. с., Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Москва, Российская Федерация; e-mail: tsa@miee.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3163-5741>.

Селищев Сергей Васильевич, д. ф.-м. н., директор института биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Зеленоград, Москва, Российская Федерация; e-mail: selishchev@bms.zone. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5589-7068>.

Герасименко Александр Юрьевич, к. ф.-м. н., доцент института биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Зеленоград, Москва, Российская Федерация; с. н. с., Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Москва, Российская Федерация; заведующий лабораторией биомедицинских нанотехнологий, Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова, Москва, Российская Федерация; e-mail: gerasimenko@bms.zone. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6514-2411>.

Поступила в редакцию 12.08.2021; одобрена после рецензирования 15.09.2021; принята к публикации 15.11.2021; опубликована онлайн 25.12.2021.