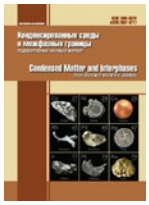


ISSN 1606-867X (Print)
ISSN 2687-0711 (Online)
Конденсированные среды и межфазные границы
https://journals.vsu.ru/kcmf/

Оригинальные статьи

Научная статья
УДК 538.958
Научная специальность ВАК – 1.3.8. Физика конденсированного состояния
https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13971

Исследование эффективности ограничения лазерного излучения нанокомпозитом на основе фталоцианина никеля с циклотрифосфазеновым заместителем и однослойных углеродных нанотрубок

М. С. Савельев[1,2]✉, П. Н. Василевский[1], Е. П. Оцупко[1], А. Ю. Толбин[3], А. Ю. Герасименко[1,2]

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

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

[3]Институт физиологически активных веществ Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Северный проезд, 1, Черноголовка 142432, Российская Федерация

Аннотация

Цель статьи: Ключевой задачей в области нелинейной оптики является разработка материалов с повышенной эффективностью для оптических ограничителей лазерного излучения. Подобные материалы должны обладать высоким линейным пропусканием в условиях низкоинтенсивного облучения, обеспечивая передачу полезного оптического сигнала, и одновременно демонстрировать быстрое и обратимое переключение в непрозрачное состояние при превышении порога интенсивности, обеспечивая защиту от импульсов наносекундной длительности. Реализация данных требований позволяет обеспечить сохранность высокочувствительных оптико-электронных компонентов, включая приборы с зарядовой связью (ПЗС), комплементарные структуры металл-оксид-полупроводник (КМОП) и иные детектирующие системы. В качестве перспективного материала для решения указанной задачи предлагается нанокомпозит, интегрирующий молекулы фталоцианина никеля, функционализированного циклотрифосфазеновым заместителем, и однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ).

Экспериментальная часть: Оценка нелинейно-оптических свойств синтезированного нанокомпозита проводилась методом Z-сканирования в режиме открытой апертуры. В качестве источника излучения использовался волоконный лазер на иттербии с длиной волны 1070 нм, генерирующий импульсы длительностью 4 нс с частотой повторения 50 кГц при средней мощности 550 мВт. Сравнительный анализ нелинейного отклика проводился для трех образцов, диспергированных в диметилформамиде (ДМФА): раствор *трет*-бутил замещенного фталоцианина никеля с циклотрифосфазеновым фрагментом (**1** – NiPc^t-ppz), дисперсия ОУНТ (**2**) и гибридная дисперсия на основе предложенного нанокомпозита (**3** – NiPc^t-ppz@ОУНТ). Количественная оценка эффективности ограничения для каждого образца выполнялась с использованием алгоритма CORRELATO, методология которого была описана в наших предыдущих исследованиях. Определение входных параметров для алгоритма осуществлялось на основе математической модели, базирующейся на уравнении переноса излучения и учитывающей пороговую природу нелинейно-оптического отклика.

Выводы: По результатам комплексной оценки, проведенной алгоритмом CORRELATO, нанокомпозит **3** продемонстрировала наибольшую эффективность ограничения лазерного излучения. Синергетический эффект в гибриде обусловлен комбинацией свойств исходных компонентов: низкого порога нелинейности, характерного для фталоцианинового комплекса ($F_x \approx 0.12$ Дж/см^2), и механизма дополнительного нелинейного рассеяния, вносимого

✉ Савельев Михаил Сергеевич, e-mail: t1004380@org.miet.ru

© Савельев М. С., Василевский П. Н., Оцупко Е. П., Толбин А. Ю., Герасименко А. Ю., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

углеродными нанотрубками. В результате гибридизации достигнуто существенное увеличение нелинейного коэффициента поглощения, значение которого для композита превысило 480 см/ГВт.

Ключевые слова: ограничители лазерного излучения, углеродные нанотрубки, фталоцианины, Z-сканирование, уравнение переноса излучения, нелинейное поглощение, нелинейное преломление, CORRELATO

Источник финансирования: Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 25-73-20034).

Для цитирования: Савельев М. С., Василевский П. Н., Оцупко Е. П., Толбин А. Ю., Герасименко А. Ю. Исследование эффективности ограничения лазерного излучения нанокомпозитом на основе фталоцианина никеля с циклотрифосфазеновым заместителем и однослойных углеродных нанотрубок. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2026;28(3): 425–435. https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13971

Original articles

Research article
https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13971

Study on the efficiency of laser radiation attenuation using a nickel phthalocyanine-based nanocomposite with cyclotriphosphazene substituent and single-walled carbon nanotubes

M. S. Savelyev[1,2]✉, P. N. Vasilevsky[1], E. P. Otsupko[1], A. Yu. Tolbin[3], A. Yu. Gerasimenko[1,2]

[1]National Research University of Electronic Technology,
1, Shokin sq., Zelenograd, Moscow 124498, Russian Federation

[2]I. M. Sechenov First Moscow State Medical University,
8-2, Trubetskaya st., Moscow 119991, Russian Federation

[3]Institute of Physiologically Active Compounds at Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry of the Russian Academy of Sciences,
1, Severny proezd, Chernogolovka 142432, Russian Federation

Abstract

Objectives: A key challenge in nonlinear optics is the development of high-performance materials for optical limiters of laser radiation. Such materials must combine high linear transmittance under low-intensity irradiation—ensuring efficient transmission of the useful optical signal—with fast, reversible switching to an opaque state once the intensity threshold is exceeded, thereby providing protection against nanosecond-duration pulses. Meeting these requirements is essential for safeguarding sensitive optoelectronic components, such as charge-coupled devices (CCDs), complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) structures, and other detection systems. A promising candidate to address this challenge is a nanocomposite that integrates single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) with nickel phthalocyanine molecules functionalized by a cyclotriphosphazene substituent.

Experimental: The nonlinear optical properties of the synthesized nanocomposite were evaluated using the open aperture Z-scan method. A 1070 nm ytterbium fiber laser was used as the radiation source, generating 4 ns pulses with a repetition rate of 50 kHz at an average power of 550 mW. A comparative analysis of the nonlinear response was performed for three samples dispersed in dimethylformamide (DMF): a solution of tert-butyl-substituted nickel phthalocyanine with a cyclotriphosphazene moiety (1 – NiPct-ppz), an SWCNT dispersion (2), and a hybrid dispersion based on the proposed nanocomposite (3 – NiPct-ppz@SWCNT). A quantitative assessment of the confinement efficiency for each sample was performed using the CORRELATO algorithm, the methodology of which was described in our previous studies. The input parameters for the algorithm were determined based on a mathematical model grounded in the radiation transfer equation and accounting for the threshold nature of the nonlinear optical response.

Conclusions: According to the results of a comprehensive evaluation conducted using the CORRELATO algorithm, nanocomposite 3 demonstrated the greatest effectiveness in attenuating laser radiation. The synergistic effect in the hybrid is due to the combination of the properties of the constituent components: a low nonlinearity threshold characteristic of the phthalocyanine complex ($F_x \approx 0.12$ J/cm^2), and the mechanism of additional nonlinear scattering introduced by carbon nanotubes. As a result of hybridization, a significant increase in the nonlinear absorption coefficient was achieved, with a value exceeding 480 cm/GW for the composite.

Keywords: Laser radiation limiters, Carbon nanotubes, Phthalocyanines, Z-scan, Radiation transfer equation, Nonlinear absorption, Nonlinear refraction, CORRELATO

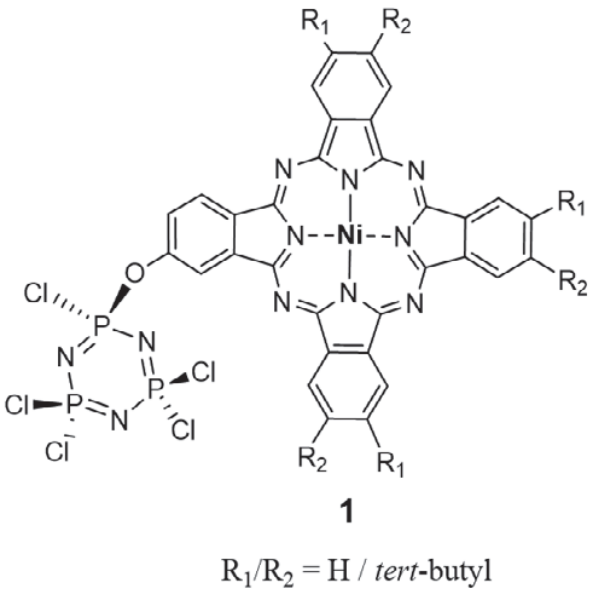
✉ Mikhail Savelyev, t1004380@org.miet.ru
© Savelyev M. S., Vasilevsky P. N., Otsupko E. P., Tolbin A. Yu., Gerasimenko A. Yu., 2026

Funding: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (Grant 25-73-20034).
For citation: Savelyev M. S., Vasilevsky P. N., Otsupko E. P., Tolbin A. Yu., Gerasimenko A. Yu. Study on the efficiency of laser radiation attenuation using a nickel phthalocyanine-based nanocomposite with cyclotriphosphazene substituent and single-walled carbon nanotubes. *Condensed Matter and Interphases*. 2025;27(3): 425–435. https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13971

1. Введение

Разработка эффективных пассивных средств лазерной защиты для светочувствительных устройств, включая камеры на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) и комплементарных структур металл-оксид-полупроводник (КМОП), а также других детектирующих систем, остается актуальной научной задачей [1–3]. Ключевое требование к таким материалам заключается в обеспечении высокого пропускания рабочего оптического сигнала при одновременной способности к резкому ослаблению излучения высокой интенсивности. Выполнение данного условия критически важно для функционирования высокопроизводительных оптических элементов, необходимых для развития мощных лазерных систем, особенно в космических приложениях, где требуются как высокая частота повторения импульсов, так и режим непрерывной работы. Повреждение таких компонентов сокращает их срок службы в применениях, связанных с лазерной локацией, обнаружением гравитационных волн и космическим лидарным зондированием [4]. Применение традиционных цветных светофильтров ограничено в силу равномерного ослабления как опасного, так и полезного сигнала, что делает невозможной работу устройств в штатном режиме [5]. Кроме того, широко используются системы, работающие в спектральном диапазоне около 1 мкм с наносекундными импульсами и различной частотой повторения [6]. В связи с этим, в данной работе исследовалось ослабление лазерного излучения с длиной волны 1070 нм, длительностью импульсов 4 нс и частотой повторения 50 кГц.

Для ближнего инфракрасного диапазона уже предложен ряд материалов, проявляющих нелинейные оптические свойства [7, 8]. Тем не менее, сохраняется необходимость повышения эффективности оптического ограничения мощного лазерного излучения [9]. Среди перспективных материалов выделяются фталоцианины, демонстрирующие структурную стабильность даже при воздействии интенсивных фемтосекундных импульсов [10, 11], и углеродные нанотрубки, которые благодаря сочетанию поглощения и рассеяния превосходят другие аллотропные формы углерода [12]. Повышение эффективности требует учёта специфических особенностей данных материалов. Для фталоцианинов ключевое значение имеет молекулярная структура [13–16], определяющая их оптические свойства и поддающаяся моделированию квантовохимическими методами [9, 17]. Среди углеродных наноматерилов наиболее перспективными являются одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) [18]. Хотя их оптические свойства могут быть схожи со свойствами многостенных нанотрубок [11, 19], функционализация ОУНТ позволяет более эффективно модифицировать нелинейные характеристики. Это объясняется невозможностью взаимодействия красителя с внутренними стенками многостенных нанотрубок. Известно, что формирование наноструктур с участием нанотрубок осуществляется преимущественно двумя способами: путём связывания с внешними стенками [11, 18–20] или заполнением внутренней полости молекулами красителей, что достижимо при наличии открытых концов и определённом диаметре нанотрубок [21]. Существенную роль играет степень диспергирования ОУНТ, которые могут присутствовать в виде агломератов, клубков или индивидуаль-



1

R_1/R_2 = H / *tert*-butyl

Рис. 1. Химическая структура фталоцианина 1

но диспергированных нанотрубок [22]. Данный фактор влияет на эффективность функционализации и может ограничивать величину нелинейного оптического отклика [23]. В настоящей работе исследованы наноструктуры, состоящие из ранее синтезированного *трет*-бутил замещенного фталоцианина никеля с циклотрифосфазеновым заместителем (**1**), структура которого была изучена при помощи квантово-химического моделирования [9], и ОУНТ, диспергированных с использованием погружного гомогенизатора в диметилформамиде (ДМФА), обеспечивающем наилучшее диспергирование нанотрубок [23].

Функциональные группы могут оказывать значительное влияние на агломерацию частиц [24, 25]. Аналогичный эффект наблюдался при ковалентном присоединении фталоцианинов с различными центральными атомами металлов [5]. Для подавления агломерации могут применяться поверхностно-активные вещества (ПАВ) [26, 27], особенно в случаях, когда синтезированный материал сохраняет склонность к агрегации. В данной работе в качестве ПАВ использовался Тритон X-100.

В связи с этим настоящая работа посвящена разработке и комплексному исследованию гибридного наноматериала на основе функционализированного фталоцианина никеля и одностенных углеродных нанотрубок (NiPc^t-ppz@ОУНТ) для создания эффективных оптических ограничителей лазерного излучения в ближнем ИК диапазоне. Основное внимание будет уделено систематическому исследованию нелинейно-оптических характеристик наноматериала методом Z-сканирования в условиях, моделирующих реальные условия эксплуатации оптических ограничителей, а также апробации математической модели, адекватно описывающей эффективность оптического лимитирования, полученной методом CORRELATO. Проведённое исследование вносит вклад в решение фундаментальной проблемы создания материалов с управляемыми нелинейно-оптическими свойствами для защиты оптоэлектронных устройств от мощного лазерного излучения.

2. Материалы и методы

2.1. Материалы

Были приготовлены три дисперсии в среде N,N-диметилформамида (ДМФА): фталоцианин никеля (концентрация ~ $1.5\cdot10^{-4}$ М), функционализированный циклотрифосфазеновым фрагментом (образец **1**); однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ) марки Tuball (концентрация ~ 0.002 мас. %), стабилизированные поверхностно-активным веществом (ПАВ) Triton X-100 (образец **2**); наноструктурный комплекс на основе фталоцианина никеля (с циклотрифосфазеновым фрагментом) (концентрация ~ $1.5\cdot10^{-4}$ М) и ОУНТ (концентрация ~ 0.002 мас. %), стабилизированный ПАВ Triton X-100 (образец **3**).

Использованные нанотрубки Tuball характеризовались следующими параметрами: чистотой не менее 99 мас. %, содержанием других аллотропных форм углерода и металлических примесей менее 1 мас. %, средним диаметром ~1.6 нм, длиной свыше 5 мкм, удельной поверхностью ≈ 1000 м^2/г [28]. Дисперсии, содержащие нанотрубки (образцы **2** и **3**), готовили с использованием погружного ультразвукового гомогенизатора Soniqator Q700 (QSonica, США) (20 кГц, 280 Вт) в течение 2 часов. Для предотвращения перегрева процесс проводили в охлаждаемой водяной бане, поддерживая температуру реакционной смеси не выше 40 °C. Спектральные измерения полученных образцов в ДМФА выполняли на спектрофотометре GENESYS 10S (Thermo Fisher Scientific, США).

Полученные дисперсии демонстрируют высокую устойчивость к воздействию мощного лазерного излучения, что обеспечивает стабильность их линейных оптических свойств. Применение несепарированных ОУНТ смешанной хиральности позволяет достичь широкополосного оптического отклика в ближней ИК области спектра при контролируемой концентрации [29]. Ковалентная пришивка фталоцианиновых комплексов к поверхности нанотрубок в сочетании с использованием ПАВ способствует снижению склонности ОУНТ к агломерации и повышает долговременную стабильность дисперсий.

2.2. Z-сканирование (открытая апертура)

Эксперименты по исследованию нелинейно-оптических свойств проводились на установке, схема которой представлена на рис. 2. В качестве источника излучения использовался иттербиевый лазер со следующими параметрами: средняя мощность 550 мВт, частота повторения импульсов 50 кГц, длительность импульса 4 нс. Регулировка мощности падающего излучения осуществлялась с помощью поляризационного аттенюатора, состоящего из фиксированного поляризатора и вращающейся призмы Глана–Тейлора (Standa, Lithuania). После осла-

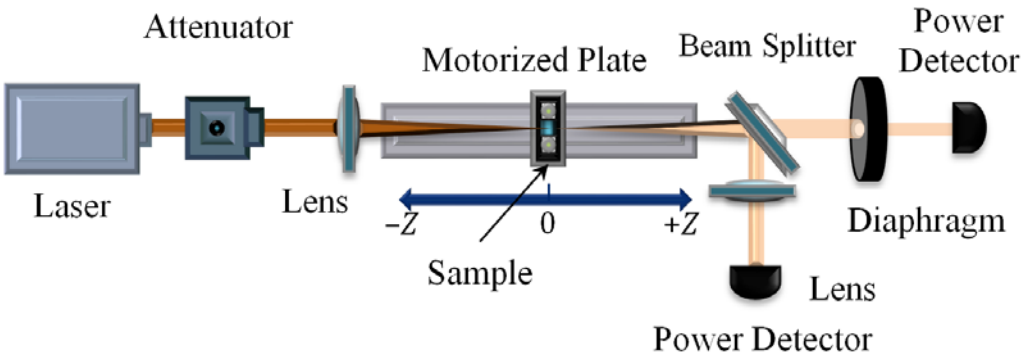


Рис. 2. Схема эксперимента для определения оптических характеристик методом Z-сканирования

бления лазерный пучок фокусировался линзой. Длина Рэлея составила ~ 0.1 см. Вариация плотности мощности (экспозиции) на образце достигалась его перемещением вдоль оптической оси (Z) с помощью моторизованной платформы. За начало координат (Z = 0) было принято положение фокальной плоскости. Перемещение образца, помещенного в кварцевую кювету толщиной 0.1 см, осуществлялось в диапазоне от $-z_{max}...+z_{max}$ относительно фокуса. Для регистрации сигнала в режиме открытой апертуры часть излучения, прошедшего через образец, отклонялась светоделительной пластиной, коллимировалась второй линзой и регистрировалась детектором мощности. Нелинейный коэффициент поглощения определялся путем аппроксимации экспериментальной зависимости нормированного пропускания от положения образца (Z-сканирование). Линейный коэффициент поглощения измерялся при положении образца вдали от фокальной плоскости, где влияние нелинейных эффектов пренебрежимо мало.

2.3. Z-сканирование (закрытая апертура)

Для определения нелинейного показателя преломления проводили Z-сканирование с закрытой апертурой. Нормированное пропускание при закрытой апертуре корректировали делением на кривую, полученную в режиме открытой апертуры, чтобы исключить вклад нелинейного поглощения. Нелинейный коэффициент преломления рассчитывали по стандартной методике Z-сканирования; линейный показатель преломления измеряли рефрактометром.

3. Теоретическая часть

3.1. Z-сканирование (открытая апертура)

Определение нелинейного коэффициента поглощения производилось путем решения уравнения переноса излучения [5]:

$$\int_{I_0}^{I} \frac{1}{I\mu(I)} dI = -d\,. \qquad (1)$$

В выражении (1) I – интенсивность на выходе, I_0 – падающая интенсивность, μ – коэффициент поглощения, d – толщина слоя. В случае поглощения, зависимого от интенсивности, коэффициент является функцией I (учитывается пороговая интенсивность I_x, и нелинейный вклад β наряду с линейной составляющей α):

$$\mu(I) = \alpha + \beta(I - I_x)\eta(I - I_x)\,. \qquad (2)$$

В выражении (2): α – линейный коэффициент поглощения (см$^{-1}$), β – нелинейный коэффициент поглощения (см/ГВт), I_x – пороговая интенсивность лазерного излучения (Дж/см^2). В предположении однородного распределения интенсивности излучения в объёме материала коэффициент поглощения можно считать постоянным, что справедливо для гомогенных систем. Для луча с профилем «плоская вершина» выражение для нормированного пропускания получается путём подстановки уравнения (2) в уравнение (1):

$$T_n(z) = \exp\left(-\frac{2\beta}{\pi^{3/2}\nu\tau w^2(z)}(P_0 - P_x)d\right). \qquad (3)$$

В выражении (3) для описания пульсирующего луча введены следующие параметры: ν – частота повторения импульсов (Гц), τ – длительность импульса (нс), w – радиус луча (мкм), который при Z-сканировании зависит от смещения z, радиуса в фокусе w_0 и длины Рэлея z_0:

$$w^2(z) = w_0^2\left(1 + \frac{z^2}{z_0^2}\right). \qquad (4)$$

В формуле (3) падающая и пороговая мощности обозначены как P_0 и P_x. Указанные параме-

тры используются для определения интенсивности в формулах (1) и (2) при помощи выражения:

$$I = \frac{2P}{\pi^{3/2}\nu\tau w^2}. \quad (5)$$

Способность к затемнению характеризуется коэффициентом ослабления $D_р$ и определяется отношением выходной мощности к входной:

$$D_р = 10\lg\left(\frac{P_0}{P_{out}}\right). \quad (6)$$

В выражении (6) P_{out} – прошедшая мощность. Аналитическое выражение (3) для нормированного пропускания при выбранной модели нелинейного поглощения используется при аппроксимации экспериментальных кривых.

3.2. Z-сканирование (закрытая апертура)

Нелинейный коэффициент преломления n_n определялся по нормированной кривой пропускания, полученной при закрытой апертуре с учетом коррекции по открытой апертуре (чтобы исключить вклад нелинейного поглощения) [30]. По форме и амплитуде скорректированной кривой вычислено значение n_n по формуле:

$$T_n(x) = 1 - \frac{16n_nP_0\left(1-\exp\left(-\alpha d\right)\right)x}{\lambda\nu\tau w^2\alpha\sqrt{\pi}\left(x^2+9\right)\left(x^2+1\right)}. \quad (7)$$

В выражении (7) введена нормированная координата $x = z/z_0$, λ – длина волны излучения (нм).

3.3. Изучение свойств по ограничению лазерного излучения

Оценка эффективности оптического ограничителя выполнялась по совокупности параметров: линейный коэффициент поглощения α, нелинейный коэффициент поглощения β, динамический диапазон DR, пороговая экспозиции F_x и коэффициент ослабления $D_р$. Для их комплексной оценки применялись корреляционные соотношения, разработанные ранее с использованием алгоритма CORRELATO и подтверждённые в нашей работе [5]. Введены дескрипторы σ_1 и σ_2:

$$\sigma_1 = \lg\left(\beta^{-1}\alpha^{-2}\right), \quad (8)$$

$$\sigma_2 = 10^{\frac{D_р}{10}}\frac{\beta}{DR\cdot F_x}. \quad (9)$$

Определяемый из выражения (8) параметр σ_1 характеризует негативное влияние агрегации на эффективность ограничения. Чем сильнее значение смещено в отрицательную область или чем оно меньше, тем меньше негативный вклад агрегации на оптическое лимитирование [31]. При этом σ_2 (выражение 9) отражает совокупную оптическую нелинейность (модель училась на квантово-химических данных) и должно иметь максимально возможное значение для улучшения свойств потенциального ограничителя [32].

Динамический диапазон и пороговая экспозиция определяются соответствующими соотношениями:

$$DR = \frac{P_0}{P_x}, \quad (10)$$

$$F_x = \frac{2P_x}{\pi\nu w_0^2}. \quad (11)$$

Взаимосвязь дескрипторов σ_1 и σ_2 анализируется в билогарифмической шкале (график θ_2 против θ_1):

$$\theta_1 = \lg\left(\sigma_2\right), \quad (12)$$

$$\theta_2 = \lg\left(\sigma_1^2\sigma_2^2\right). \quad (13)$$

Рассчитанные значения должны иметь линейную взаимосвязь.

4. Экспериментальная часть

На рис. 3 представлены нормированные спектры оптической плотности всех исследуемых образцов. Нормировка проведена по максимуму полосы поглощения (Q-полосы). В спек-

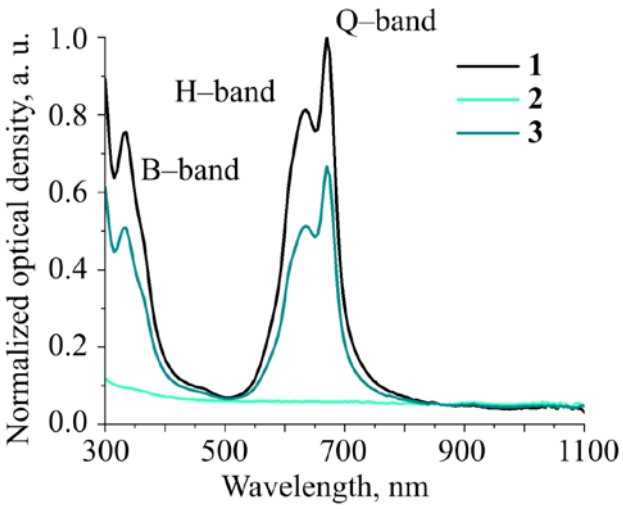


Рис. 3. Спектр нормированной оптической плотности образцов

трах четко идентифицируются характерные для фталоцианинового хромофора полосы поглощения: B-полоса (Соре) и Q-полоса.

На рис. 4a приведены зависимости нормированного пропускания от положения образца относительно фокальной плоскости (Z-сканирование), полученные в режиме открытой апертуры. Минимальное значение нормированного пропускания наблюдается для образца **3**. Образцы **1** и **2**, представляющие собой индивидуальные компоненты нанокомпозита (образец **3**), демонстрируют менее выраженную нелинейно-оптическую реакцию, что проявляется в более высоких значениях минимума на их кривых. Экспериментальные данные аппроксимированы теоретическими кривыми, рассчитанными по формуле (3).

На рис. 4b представлена зависимость нормированного пропускания от положения образца, полученная путем деления кривых, измеренных в режимах закрытой и открытой апертуры. Нелинейный коэффициент преломления рассчитан по формуле (7). Наибольшее изменение показателя преломления наблюдается для образца **3** и существенно превышает значения, полученные для образцов **1** и **2**, что свидетельствует о синергетическом усилении нелинейного отклика в нанокомпозите. Для количественного анализа были рассчитаны нелинейные оптические параметры материалов (двухфотонный коэффициент поглощения, нелинейная рефракция), представленные в табл. 1.

5. Результаты и обсуждение

Оптические характеристики всех трёх образцов суммированы в табл. 1. Сканирование по Z-координате проводилось в диапазоне перемещения образца от –1 до +1 см. Корреляционный анализ выполнен с использованием формул (8), (9), (12) и (13) после подстановки в них значений с размерностью, указанной в таблице.

На рис. 5 представлено распределение нелинейных поглотителей по различным зонам. Разделение по областям и выбор «золотой» середины является условным, но значительно облегчает проведение визуальной интерпретации данных. Анализ по дескрипторам σ_1 и σ_2 позволяет выделить образец **3**, для которого характерны наибольшие значения обоих дескрипторов. Это может быть обусловлен переносом энергии между фталоцианином (донор электронов) и нанотрубкой (акцептор) [33, 34]. Эффективный переход заряда открывает перспективы для улучшения оптического ограничения. В случае образцов **1** и **2** оценка их эффективности является менее однозначной. Для разрешения этой неопределенности был применен билогарифмический масштаб (рис. 6). Если материал попадает в область отрицательных значений θ_1 и θ_2, его практические свойства, вероятно, являются недостаточными, а сам материал классифицируется как относящийся к «слабой» серии [5]. В ходе исследования таких материалов выявлено не было. Таким образом, материалы **1** и **2** были отнесены к «средней» области, а нанокомпозит **3** – к «сильной».

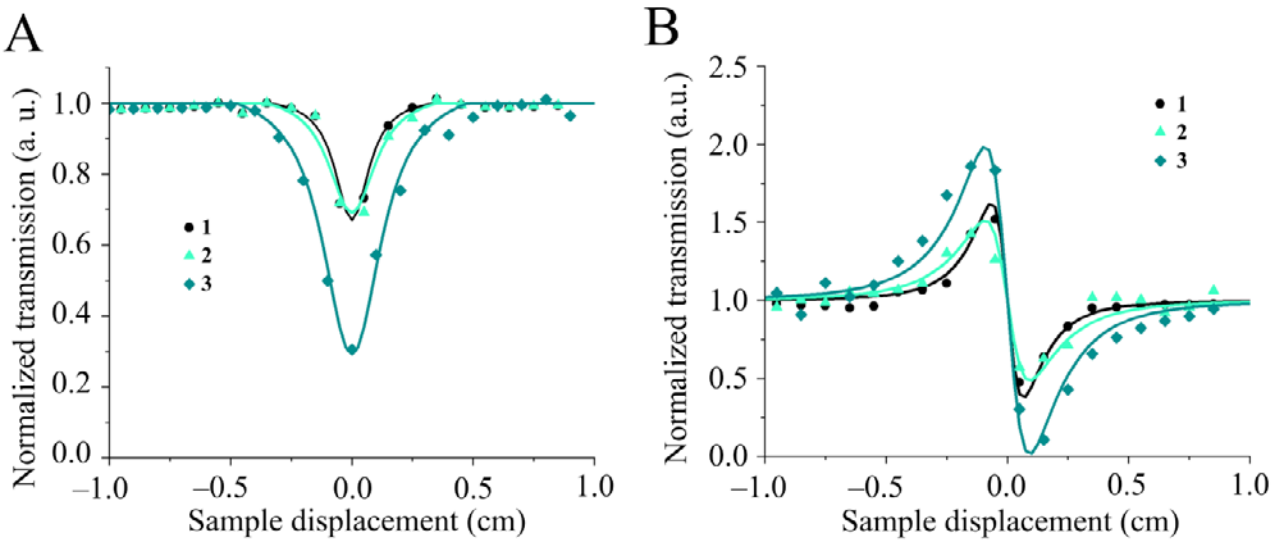


Рис. 4. Данные эксперимента Z-сканирования: открытая апертура (a); данные с закрытой апертурой разделённые на данные с открытой (b)

Таблица 1. Оптические параметры изготовленных дисперсий

Характеристика	Образец		
	1	**2**	**3**
Падающая мощность (P_0), мВт	544	541	540
Линейный коэффициент поглощения (α), см$^{-1}$	1.9	1.7	2.0
Нелинейный коэффициент поглощения (β), см/ГВт	110	150	480
Радиус луча в фокусе линзы (w_0), мкм	16	19	19
Пиковая интенсивность (I_0), ГВт/см^2	0.15	0.11	0.11
Пороговая экспозиция (F_x), Дж/см^2	0.12	0.16	0.12
Линейный показатель преломления (n_0)	1.4272	1.4270	1.4278
Нелинейный показатель преломления (n_n), см^2/ГВт	1.5	1.9	4.0
Коэффициент ослабления (D_p), Дб	2.6	2.1	5.7
Динамический диапазон (*DR*)	21.8	12.0	15.4
σ_1	2.60	2.64	3.28
σ_2	74	127	936
θ_1	1.87	2.11	2.97
θ_2	4.57	5.05	6.98

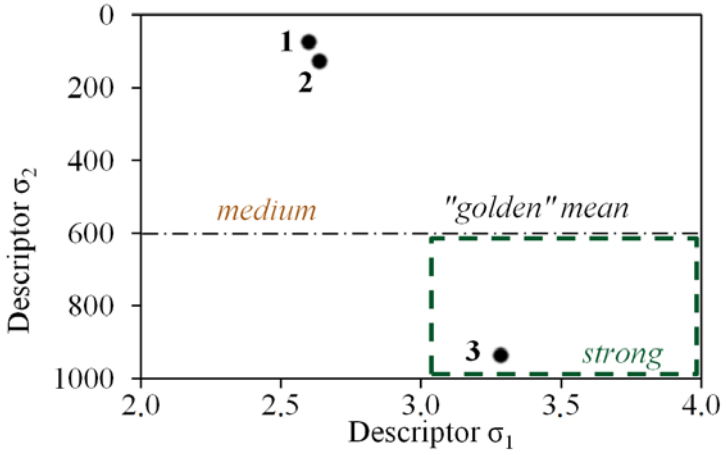


Рис. 5. Зависимость значений дескриптора σ_2 от дескриптора σ_1

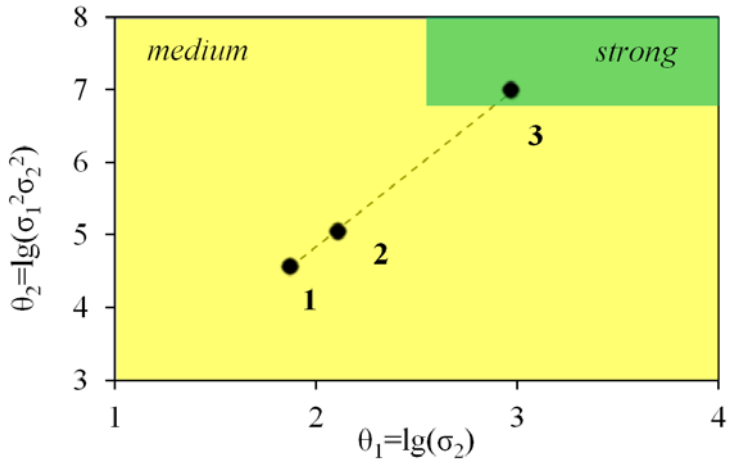


Рис. 6. Оценка достоверности результатов корреляционного анализа в двойном логарифмическом масштабе (θ_2 *vs* θ_1)

Были получены следующие основные результаты:

– Максимальное значение нелинейного коэффициента поглощения (480 см/ГВт) зарегистрировано для образца **3**, который также демонстрирует высокое значение нелинейного коэффициента преломления;

– Наименьшая пороговая мощность наблюдается для образца **1**;

– Согласно граничным условиям по дескрипторам σ_1 и σ_2, образец **3** относится к «сильной» области;

– Установлено, что образцы **1** и **2** занимают промежуточное положение по эффективности и относятся к «средней» области;

– При билогарифмическом анализе все материалы образуют линейную зависимость, что подтверждает применимость используемой модели для их описания.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы. Нанокомпозит **3** продемонстрировал наибольшую эффективность и наилучшие характеристики ослабления мощного лазерного излучения, а также низкое значение пороговой экспозиции, сравнимое с образцом **1**, для которого значение обусловлено, прежде всего, структурой фталоцианина [15, 16]. Динамический диапазон для образца **3** обусловлен большим радиусом луча (связано с разной фокусировкой внутри материала) вследствие фокусировки, что при близкой мощности привело к уменьшению максимальной экспозиции лазерного излучения при проведении исследований. Это свидетельствует о перспективности его практического применения в качестве эффективного нелинейного оптического ограничителя для создания высокоскоростных оптических устройств. Важной задачей является контроль рассеяния в образцах **2** и **3**, содержащих ОУНТ, поскольку оно вносит вклад в общее ослабление. Образцы **1** и **2**, демонстрируя сходные свойства, значительно уступают образцу **3** по эффективности, что обусловило их отнесение к «средней» области. При этом перенос энергии между фталоцианином и нанотрубкой повлиял практически на все характеристики за исключением пороговой экспозиции.

Заявленный вклад авторов

Савельев М. С. – написание текста, создание теоретической модели, итоговые выводы. Василевский П. Н. – анализ экспериментальных данных, развитие методологии, редактирование текста. Оцупко Е. П. – получение данных для анализа. Толбин А. Ю. – концепция исследования, создание теоретической модели, 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. Lv X., Pan Y., Jia Z., Li Z., Ni X. Surface damage induced by a combined millisecond and nanosecond laser. *Applied Optics*. 2017;56: 5060. https://doi.org/10.1364/AO.56.005060

2. Westgate C., James D. Visible-band nanosecond pulsed laser damage thresholds of silicon 2D imaging arrays. *Sensors*. 2022;22: 2526. https://doi.org/10.3390/s22072526

3. Jian Z., Zhou W., Chang H., Ma Y., Quan X., Wang Z. Thermal damage characterization of detector induced by nanosecond pulsed laser irradiation. *Photonics*. 2025;12: 790. https://doi.org/10.3390/photonics12080790

4. Pan Q., Wang K., Han J., Ma B. Damage dynamics and relaxation process of double pulses with nanosecond laser. *Photonics Research*. 2025;13: 2246. https://doi.org/10.1364/PRJ.539648

5. Савельев М. С., Василевский П. Н., Дудин А. А., Толбин А. Ю., Павлов А. А., Герасименко А. Ю. Свойства оптического лимитирования композитов фталоцианиновых комплексов железа, никеля и кобальта с одностенными углеродными нанотрубками и оценка их эффективности новейшими корреляционными методами. *Журнал технической физики*. 2025;95(5): 967. https://doi.org/10.61011/JTF.2025.05.60288.443-24

6. Bi W., Meng Y., Wang Y., … Liu H. Failure mechanisms of a silicon-based CMOS image sensor irradiated by a 1550 nm nanosecond laser. *Optics Express*. 2024;32: 4709. https://doi.org/10.1364/OE.515728

7. Kawya J., Girisun T. C. S. Upconversion enabled optical limiting behaviour in Y_2O_3: Yb, Er nanophosphors under 532 nm and 1064 nm laser excitation. *Journal of Luminescence*. 2025;277: 120903. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2024.120903

8. Stavrou M., Papadakis I., Bawari S., Narayanan T. N., Couris S. Giant broadband (450–2300 nm) optical limiting and enhancement of the nonlinear optical response of some graphenes by defect engineering. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2021;125: 16075–16085. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c05495

9. Tolbin A. Y., Savelyev M. S., Vasilevsky P. N., Gerasimenko A. Y. Conditions for the efficiency of optical limiting based on experiment and quantum chemical calculations. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2024;26: 8965–8972. https://doi.org/10.1039/D4CP00055B

10. Xiao Z., Shi Y., Sun R., … Song Y. Ultrafast broadband optical limiting in simple pyrene-based molecules with high transmittance from visible to infrared regions. *Journal of Materials Chemistry C*. 2016;4: 4647–4653. https://doi.org/10.1039/C5TC04047G

11. Venkatram N., Narayana Rao D., Giribabu L., Venugopal Rao S. Femtosecond nonlinear optical properties

of alkoxy phthalocyanines at 800 nm studied using Z-scan technique. *Chemical Physics Letters*. 2008;464: 211–215. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2008.09.029

12. Tolbin A. Y., Tretyakov B. A., Savelyev M. S., Vasilevsky P. N., Gerasimenko A. Y. Intelligent methods for assessing the efficiency of optical limiters based on carbon nanomaterials using the CORRELATO approach. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2025;27: 18467–18477. https://doi.org/10.1039/D5CP02157J

13. de la Torre G., Vázquez P., Agulló-López F., Torres T. Role of structural factors in the nonlinear optical properties of phthalocyanines and related compounds. *Chemical Reviews*. 2004;104: 3723–3750. https://doi.org/10.1021/cr030206t

14. Ou C., Lv W., Chen J., ... Yang G. Structural, photophysical and nonlinear optical limiting properties of sandwich phthalocyanines with different rare earth metals. *Dye and Pigments*. 2021;184: 108862. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108862

15. Kuzmina E. A., Dubinina T. V., Tomilova L. G. Recent advances in chemistry of phthalocyanines bearing electron-withdrawing halogen, nitro and N-substituted imide functional groups and prospects for their practical application. *New Journal of Chemistry*. 2019;43: 9314. https://doi.org/10.1039/C9NJ01755K

16. Kuzmina E. A., Dubinina T. V., Vasilevsky P. N., ... 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

17. Samawi K. A., Imad Ali S., Salman T. A., Alshekhly B. A. Exploring the capabilities of metal-doped phthalocyanine (MPC, M = Co, Cu, Fe, Ni, Zn) for adsorption of CO_2: a DFT study. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*. 2025;140: 109088. https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2025.109088

18. Gowda P. B. R., Bhovi V. K., Hegde S. N., ... Kariduraganavar M. Y. Enhanced optoelectronic properties of single-walled carbon nanotubes via functionalization with pyridine-based Y-shaped chromophores. *Carbon N. Y.* 2025;245: 120744. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2025.120744

19. Mathew R. J., Chandran A. R., Kishor K. S. S., Joseph L. K., Saji K. J., Sajeev U. S. Tunable nonlinear optical properties in polyaniline-multiwalled carbon nanotube (PANI-MWCNT) system probed under pulsed Nd:YAG laser. *Next Materials*. 2025;*6*: 100431. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2024.100431

20. Elwekeel W. M., Salah A., Ismail T., ... Anis B. Superior nonlinear optical and optical limiting properties of cross-linked and thermally stable HiPCO-SWCNTs@PVA films. *Optical Materials*. 2021;122: 111732. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111732

21. Gonzalez-Muñoz D., Martin-Somer A., Strobl K., ... Aleman J. Enhancing visible-light photocatalysis via endohedral functionalization of single-walled carbon nanotubes with organic dyes. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021;13: 24877–24886. https://doi.org/10.1021/acsami.1c04679

22. Wang S., Liang Z., Wang B., Zhang C., Rahman Z. Precise cutting of single-walled carbon nanotubes. *Nanotechnology*. 2007;18: 055301. https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/5/055301

23. Vasilevsky P. N., Savelyev M. S., Tolbin A. Y., ... Gerasimenko A. Y. Nonlinear optical response of dispersed medium based on conjugates single-walled carbon nanotubes with phthalocyanines. *Photonics*. 2023;10: 537. https://doi.org/10.3390/photonics10050537

24. Benko A., Duch J., Gajewska M., ... Kotarba A. Covalently bonded surface functional groups on carbon nanotubes: from molecular modeling to practical applications. *Nanoscale*. 2021;13: 10152–10166. https://doi.org/10.1039/D0NR09057C

25. Rajendran D., Ramalingame R., Adiraju A., Nouri H., Kanoun O. Role of solvent polarity on dispersion quality and stability of functionalized carbon nanotubes. *Journal of Composites Science*. 2022;6: 26. https://doi.org/10.3390/jcs6010026

26. Metaxa Z. S., Boutsioukou S., Amenta M., Favvas E. P., Kourkoulis S. K., Alexopoulos N. D. Dispersion of multi-walled carbon nanotubes into white cement mortars: the effect of concentration and surfactants. *Nanomaterials*. 2022;12: 1031. https://doi.org/10.3390/nano12061031

27. Yonezawa S., Chiba T., Seki Y., Takashiri M. Origin of n type properties in single wall carbon nanotube films with anionic surfactants investigated by experimental and theoretical analyses. *Scientific Reports*. 2021;11: 5758. https://doi.org/10.1038/s41598-021-85248-9

28. Predtechenskiy M. R., Khasin A. A., Bezrodny A. E., ... Smirnov S. N. New perspectives in SWCNT applications: tuball SWCNTs. Part 1. Tuball by itself—all you need to know about it. *Carbon Trends*. 2022;8: 100175. https://doi.org/10.1016/j.cartre.2022.100175

29. Berciaud S., Cognet L., Poulin P., Weisman R. B., Lounis B. Absorption spectroscopy of individual single-walled carbon nanotubes. *Nano Letters*. 2007;7: 1203–1207. https://doi.org/10.1021/nl062933k

30. Sheik-Bahae M., Said A. A., Wei T.-H., Hagan D. J., Van Stryland E. W. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1990;26: 760–769. https://doi.org/10.1109/3.53394

31. Tolbin A. Yu., Shestov V. I., Savelyev M. S., Gerasimenko A. Yu. Deviation from Beer's law and relationship of aggregation with the effective TPA coefficient: UV-vis studies on a series of low symmetry monophthalocyanines bearing a cyclotriphosphazene substituent. *New Journal of Chemistry*. 2023;47: 1165–1173. https://doi.org/10.1039/d2nj05376d

32. Tolbin A. Yu. An efficient method of searching for correlations between unlimited datasets to provide forecasting models. *Mendeleev Communications*. 2023;33: 419–421, https://doi.org/10.1016/j.mencom.2023.04.038

33. Clavian L. M., Kumar R. P. C., Kumar A. K. V., Narayana Rao D., Shihab N. K., Sanjeev G. Comprehensive analysis on the Z-scan response of thermally evaporated CuTPP thin films in terms of H aggregation and charge transfer dynamics. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2024;128: 419. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c06473

34. Wang A., Shen X., Wang Q., ... Song Y. Boosted charge transfer in porphyrin and zinc phthalocyanine co-functionalized graphene oxide nanohybrids toward improved optical limiting and H_2 evolution. *Dyes and Pigments*. 2021;187: 109142. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.109142

Информация об авторах

Савельев Михаил Сергеевич, к. ф.-м. н., доцент института биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (Зеленоград, Москва, Российская Федерация); в. н. с., Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова (Москва, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0003-1255-0686

t1004380@org.miet.ru

Василевский Павел Николаевич, ассистент, инженер института биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (Зеленоград, Москва, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0002-5733-8497

u130020@edu.miet.ru

Оцупко Екатерина Петровна, магистрант института биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (Зеленоград, Москва, Российская Федерация).

https://orcid.org/0009-0007-8645-4511

8191388@edu.miet.ru

Толбин Александр Юрьевич, д. х. н., профессор РАН, гл. н. с. ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН) (Черноголовка, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0002-5541-5401

tolbin@inbox.ru

Герасименко Александр Юрьевич, д. т. н., профессор института биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (Зеленоград, Москва, Российская Федерация); заведующий лабораторией биомедицинских нанотехнологий, Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова (Москва, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0001-6514-2411

gerasimenko@bms.zone

Поступила в редакцию 06.10.2025; одобрена после рецензирования 06.11.2025; принята к публикации 07.11.2025; опубликована онлайн 25.09.2026.