09

Свойства оптического лимитирования композитов фталоцианиновых комплексов железа, никеля и кобальта с одностенными углеродными нанотрубками и оценка их эффективности новейшими корреляционными методами

© М.С. Савельев,[1,2] П.Н. Василевский,[1,3] А.А. Дудин,[3] А.Ю. Толбин,[4] А.А. Павлов,[3] А.Ю. Герасименко[1,2]

[1]Институт биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,
124498 Зеленоград, Москва, Россия
[2]Институт бионических технологий и инжиниринга, Первый МГМУ им. И.М. Сеченова,
119991 Москва, Россия
[3]Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН,
119991 Москва, Россия
[4]Институт физиологически активных веществ Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН,
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия
e-mail: savelyev@bms.zone

Поступило в Редакцию 10 декабря 2024 г.
В окончательной редакции 10 декабря 2024 г.
Принято к публикации 10 декабря 2024 г.

В рамках реализации одного из стратегических направлений научно-технического развития РФ является создание высокоэффективной защиты от поражения лазерным излучением. Синтезирована небольшая серия фталоцианиновых комплексов с металлами 3*d*-ряда: с железом (1a), кобальтом (1b) и никелем (1c). Показано, что увеличение нелинейного оптического отклика (НЛО) данных красителей возможно путем простой их адсорбции на поверхности одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ). Оценка эффективности нелинейных поглотителей произведена по методам *Z*-сканирования с открытой диафрагмой и фиксированного расположения материала. Обнаружено, что природа металла-комплексообразователя позволила тонко настраивать НЛО свойства конечных материалов. Так, наибольшее значение нелинейного коэффициента поглощения ($\beta = 650\,\mathrm{cm/GW}$) получено для 1c (PcNi). Оценка эффективности оптического лимитирования для полученных комплексов выполнялось при помощи корреляционных соотношений, выведенных в наших предыдущих работах современным высокопроизводительным методом CORRELATO. Использованы специальные дескрипторы „эффективности“, которые позволили распределить наши материалы в рамках графического анализа на три группы. Как следствие, найдено, что композиты ОУНТ/PcFe (2a) и ОУНТ/PcCo (2b) обладают наилучшими совокупными характеристиками лимитирования и могут удовлетворять конструкторским требованиям.

Ключевые слова: оптическое ограничение, композиты, фталоцианины, одностенные углеродные нанотрубки, *Z*-сканирование, CORRELATO.

DOI: 10.61011/JTF.2025.05.60288.443-24

Введение

Важной задачей является разработка высокоэффективной защиты от поражения лазерным излучением. В промышленности, военном деле и геодезии увеличиваются случаи использования лазеров для решения повседневных задач. В первую очередь это связано с применением лидаров для автоматизации многих процессов [1–3]. Для их функционирования необходимо использование импульсного лазерного излучения и при этом они должны фиксировать слабые обратные сигналы. Лавинные фотодиоды, которые могут использоваться в качестве приемных устройств относительно легко выходят из строя при воздействии интенсивного света [4]. В случае использования КМОП и ПЗС камер также существует риск их повреждения лазерным излучением при чуть большем пороге разрушения [5,6] в случае переотражения от близко расположенных объектов в особенности для лидаров большой дальности действия [7,8]. Такого рода последствия могут возникать и при использовании ультракоротких импульсов [9]. Достаточное быстродействие способны обеспечить только пассивные средства лазерной защиты. Однако широко используемые светофильтры одинаково ослабляют как мощное, так и слабое излучения, что не позволяет их использовать в случае лидаров. Необходимыми свойствами обладают ограничители лазерного излучения на основе нелинейных поглотителей [10]. Для их применения необходимы эффективные нелинейно-оптические материалы, которые можно охарактеризовать минимум шестью параметрам [11]: линейным пропусканием, толщиной оптического слоя, нелинейным коэффициентом поглощения, динамическим

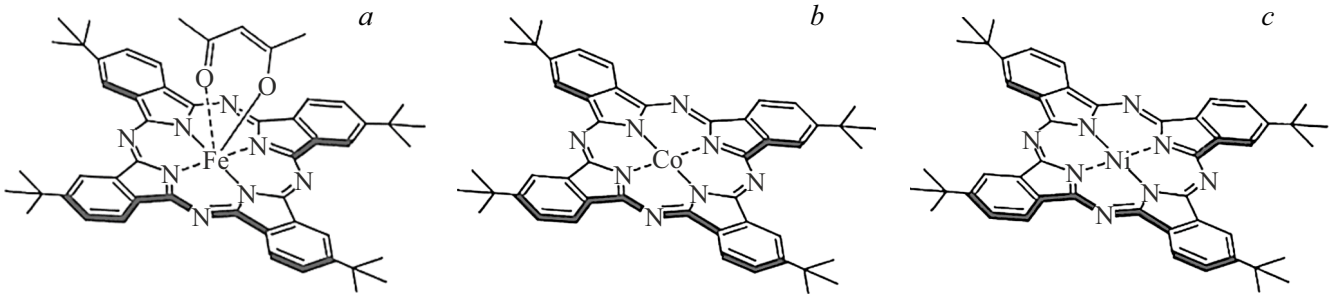

Рис. 1. Структурные формулы фталоцианинов с разными центральными ионами металлов: *a* — железа (1a); *b* — кобальта (1b); *c* — никеля (1c).

диапазоном, пороговой экспозиции лазерного излучения и коэффициентом ослабления.

Фталоцианины обладают высокой термостабильностью и устойчивостью к кислотам, что позволяет их использовать в составе растворов, при этом они обладают значительным нелинейно-оптическом откликом [11–13]. Важным их достоинством является возможность ослабления импульсов за время, меньшее длительности самого импульса, что делает возможным ограничение мощности коротких импульсов [14–16]. Также фталоцианины обладают высокими значениями динамического диапазона лимитирования [11,17,18]. Однако для использования материалов на их основе в качестве ограничителей лазерного излучения требуются как можно более высокие значения коэффициента ослабления, для достижения которого рассматриваются композитные структуры, которые, помимо комплексов фталоцианинов, объединяют в себе различные частицы [10,19].

В настоящей работе для подготовки композитных структур выбраны одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ). К ним могут быть присоединены фталоцианины за счет образования ковалентных [20] или ионных связей [21,22], в частности, формированием диполь-ионных связей после функционализации поверхности нанотрубок алкиламмониевыми катионами [23], а также посредством сил Ван-дер-Ваальса [20], которые слабее и имеют электрическую природу. Объединение красителей с поверхностью ОУНТ происходит посредством сил Ван-дер-Ваальса, $\pi - \pi$-стекинга, гидрофобных взаимодействий, водородных связей и электростатических взаимодействий [24]. Оптимальная концентрация красителя для дисперсии является результатом насыщения участков адсорбции на поверхности нанотрубок молекулами красителя и образованием мицелл в растворителе в случае применения ПАВ [25].

Созданные композитные структуры ОУНТ и комплексы фталоцианинов под действием ультразвуковой обработки погружным гомогенизатором обладают разумной устойчивостью в течение достаточного времени. Все подготовленные материалы исследовались методом *Z*-сканирования с открытой диафрагмой, и при фиксированном расположении материала производилось определение кривой лимитирования.

1. Материалы и методы исследований

1.1. Материалы

Химические структуры комплексов железа (1a), кобальта (1b) и никеля (1c) представлены на рис. 1. Структура фталоцианинового лиганда имеет псевдосимметричное строение, что важно для изотропности свойств конечных материалов. Композиты красителей 1a–c с ОУНТ (TUBALL^{TM}, Российская Федерация) формировались в три этапа. Сначала были подготовлены дисперсии ОУНТ (0.01 mass%) в диметилформамиде (ДМФА) с использованием ультразвукового гомогенизатора Soniqator Q700 (Qsonica, США) с зондом диаметром 13 mm, работающего на частоте 20 kHz. Время обработки составило 30 min при объемной плотности энергии 7560 J/ml, которая оценивалась по методике, приведенной в работе [26]. Эта величина определяется номинальной мощностью, длительностью обработки и количеством обрабатываемого образца. Для предотвращения чрезмерного перегрева во время обработки использовалась система охлаждения.

Далее были приготовлены растворы фталоцианинов 1a–c в ДМФА. Концентрация красителей подбиралась по значению линейного пропускания 75 % на длине волны 532 nm, на которой проводились лазерные измерения, при помощи регистрации спектров поглощения (рис. 2).

Заключительным этапом стало смешивание дисперсий ОУНТ в ДМФА с каждым из растворов красителей 1a–c в пропорции 10/3: ОУНТ/фталоцианин железа (2a), ОУНТ/фталоцианин кобальта (2b) и ОУНТ/фталоцианин никеля (2c). Перемешивание выполнялось с использованием ультразвукового гомогенизатора при объемной плотности энергии 3230 J/ml в течение 10 min и поддержании температуры около 50 °C. Один из образцов представлял собой исходные нанотрубки ОУНТ и далее обозначается как 2d. На рис. 3 приведены оптические спектры образцов композитов и исходных нанотрубок.

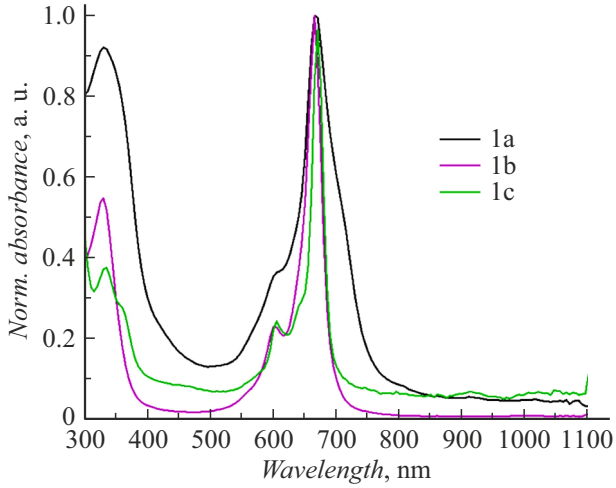

Рис. 2. Электронные спектры поглощения фталоцианинов 1a–1c в ДМФА (концентрация $\sim 1.5 \cdot 10^{-4}$ M).

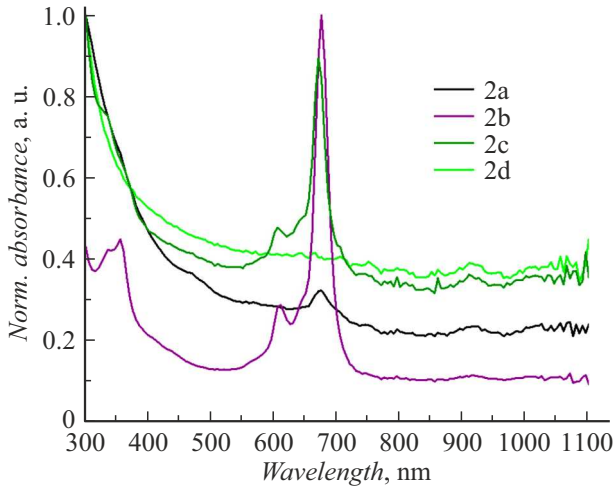

Рис. 3. Электронные спектры поглощения дисперсий композитов 2a–2c и исходных ОУНТ (2d) в ДМФА.

1.2. *Z*-сканирование с открытой диафрагмой

Исследования производились методом *Z*-сканирования с открытой диафрагмой [10] на второй гармонике (532 nm) лазера LS2147 (Lotis Tii, Белоруссия), использованного в качестве источника излучения. Экспозиция исходного (до фокусировки) падающего импульса длительностью 16 ns составила 20 J/cm^2, что позволило захватить область линейного взаимодействия и нелинейный участок вблизи фокуса линзы, где наблюдается наибольшая экспозиция лазерного излучения при неизменной энергии инициирующего импульса.

Для оценки материала как ограничителя лазерного излучения необходимо количественно оценить форму выходного сигнала оптического ограничения. Измерения производились при фиксации образца в положении минимального нормированного пропускания в соответствии с данными *Z*-сканирования с открытой диафрагмой. В этой точке значение радиуса луча в фокусе линзы составило 40 μm в соответствии с измерениями прибором с зарядовой связью — камерой SP620U (Ophir-Spiricon, Израиль). Для плавного изменения падающей энергии одиночного импульса использовалась призма Глана-Тейлора, закрепленная во вращающейся оправе.

2. Теория

Решение уравнения переноса излучения [21] для случая прямоугольной формы падающего импульса при пороговой зависимости коэффициента поглощения от интенсивности получено в аналитическом виде:

$$T_{\text{noom}} = \exp\left(\frac{\beta d}{\tau\sqrt{\pi}}\left(\frac{F_0}{w^2_{\text{noom}}} - F_x\right)\right). \qquad (1)$$

где β — нелинейный коэффициент поглощения, [cm/W)]; F_0 — экспозиция падающего излучения; d — толщина оптического слоя, [m]; τ — длительность импульса; F_x — пороговая экспозиция лазерного излучения, [J/m2], которая определяется выражением:

$$F_x = \frac{0,076}{\beta d}\,\frac{\tau\sqrt{\pi}}{2}, \qquad (2)$$

экспозиция падающего лазерного излучения обозначена F_0, [J/m^2]; τ — длительность импульса, [s]; w_{norm} — нормированный радиус луча, который определяется выражением:

$$w_{\text{norm}} = \sqrt{1 + \frac{z^2\lambda^2}{\pi^2 w_0^4}}, \qquad (3)$$

где z — смещение образца относительно фокуса линзы, [m]; λ — длина волны, [m]; w_0 — радиус луча в фокусе линзы, [m].

Оценка эффективности ограничителя лазерного излучения требует учета как минимум пяти параметров: линейного пропускания T_0, толщины оптического слоя d, нелинейного коэффициента поглощения β, динамического диапазона DR, пороговой экспозиции лазерного излучения F_x и коэффициента ослабления k_{A}. Каждая величина представляет интерес по отдельности. Высокое линейное пропускание позволяет работать с малоинтенсивным излучением с возможностью его измерения или наблюдения за местом воздействия (при значениях свыше 60 % не происходит заметного искажения данных). Толщина слоя должна быть как можно меньше, но при работе с жидкими дисперсными средами сложно работать с толщиной менее 0.2 cm из-за вязкости, поэтому она выбрана менее длины Рэлея. Значения нелинейного коэффициента поглощения должны быть максимальными для обеспечения наибольшего ослабления. Поскольку динамический диапазон определяется значениями экспозиции падающего лазерного излучения и пороговой экспозицией луча, необходимо обеспечить

Данные для оценки эффективности оптического лимитирования

Образец	T_0	β, cm·GW^{-1}	F_{th}, J/cm^2	k_A	DR	σ_1	σ_2	θ_1	θ_2
1a	0.81	1	0.18	1.01	110	0.30	0.05	−1.29	−3.64
1b	0.76	97	0.13	1.05	155	−1.90	5.05	0.70	1.96
1c	0.85	650	0.08	1.41	260	−2.28	44.06	1.64	4.00
2a	0.77	2800	0.07	4.35	260	−3.31	669.23	2.83	6.69
2b	0.80	2700	0.07	3.90	260	−3.17	578.57	2.76	6.53
2c	0.85	450	0.07	1.26	260	−2.15	31.15	1.49	3.65
2d	0.80	3000	0.11	4.25	170	−3.22	681.82	2.83	6.68

максимальное значение этой величины. С ее помощью характеризуется энергетический диапазон функционирования устройства. При этом малые значения величины пороговой экспозиции указывают на возможность ослабления малых значений энергии, которые также могут представлять опасность для светочувствительных устройств. В качестве основного параметра выделен и коэффициент ослабления, который должен быть максимальным. Для их совместной оценки воспользовались корреляционными соотношениями, выведенными в наших предыдущих работах при помощи алгоритма CORRELATO, которые уже продемонстрировали свою корректность [27]. Значения дескрипторов σ_1 и σ_2 представлены в таблице, а их аналитический вид приводится ниже:

$$\sigma_1 = \lg\left(\frac{d^2}{\beta \cdot \ln^2(T_0)}\right). \quad (4)$$

Дескриптор σ_1 отвечает за негативное влияние агрегации на эффективность оптического ограничения. Чем его значение больше смещено в отрицательную область, тем эффект от агрегации выражен сильнее [11,28]. В свою очередь, дескриптор σ_2, связанный с квантово-химическим описанием нелинейности оптических свойств, должен иметь как можно более высокое значение:

$$\sigma_2 = \frac{k_A \beta}{DR \cdot F_{thr}}. \quad (5)$$

Вычисление значений σ_1 и σ_2 является необходимым, но не достаточным критерием эффективности лимитирования в рамках функционального анализа. Подтверждением на данный момент может служить взаимосвязь этих дескрипторов в билогарифмической шкале (θ_2 *vs* θ_1), когда вычисленные значения укладываются на прямую:

$$\theta_1 = \lg(\sigma_2), \quad (6)$$

$$\theta_2 = \lg(\sigma_1^2 \sigma_2^2). \quad (7)$$

3. Эксперимент

Изучение свойств нелинейного оптического отклика (НЛО) произведено с одиночными импульсами наносекундной длительности в кювете толщиной 0.3 cm, которая подобрана с учетом длины Рэлея, равной 0.9 cm. Выполнение этого условия позволяет пренебречь изменением размеров лазерного луча внутри образца. Смещение образца производилось в интервале от −4 до 4 cm с шагом 0.05 cm, что близко к фокусному расстоянию линзы 6 cm.

3.1. *Z*-сканирование с открытой диафрагмой

Для всех комплексов фталоцианинов 1a–c получен эффект нелинейного ослабления при экспозиции лазерного излучения, превышающего соответствующее пороговое значение (рис. 4). Определение нелинейных свойств свободных красителей проводилось по формуле (1).

На рис. 5 приведены данные для дисперсных сред композитов 2a–c и свободных ОУНТ. Аналогичным способом с применением выражения (1) получены характеристики для этих материалов. Нелинейное ослабление

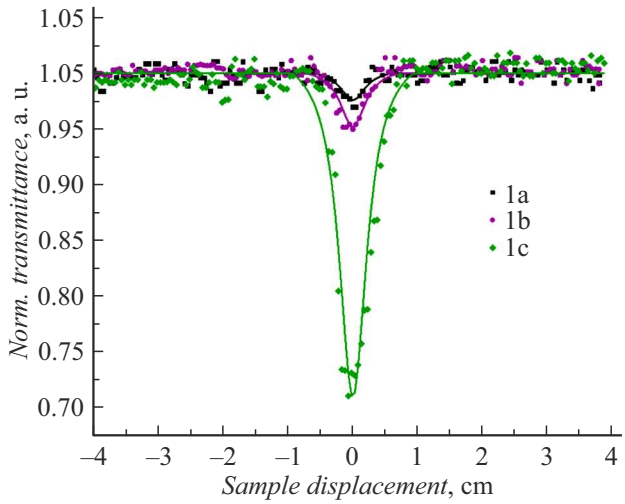

Рис. 4. Изменение пропускания по данным *Z*-сканирования с открытой диафрагмой для фталоцианиновых комплексов 1a–1c. Образцы смещались относительно фокуса линзы в диапазоне от −4 до +4 cm.

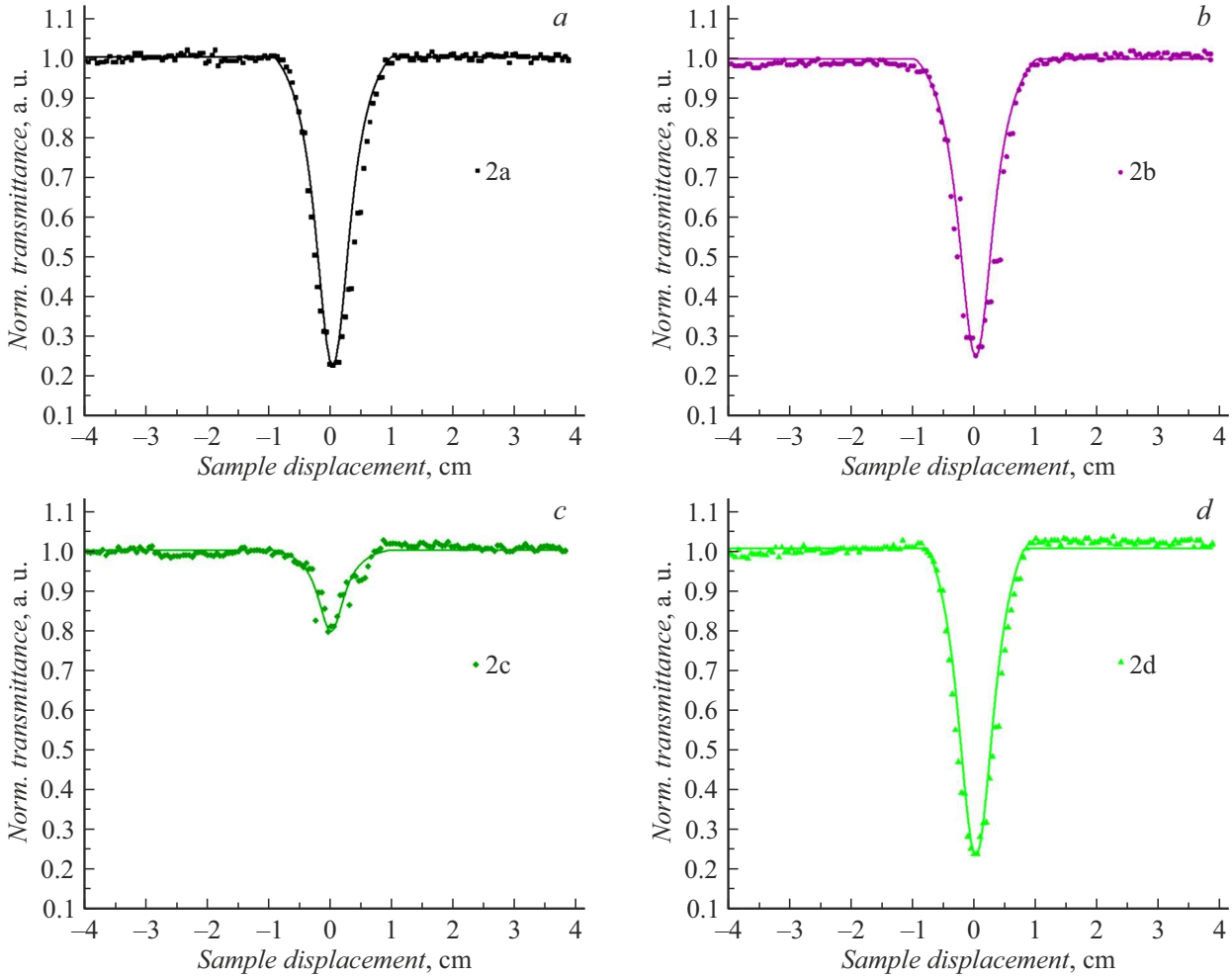

Рис. 5. Изменение пропускания по данным Z-сканирования с открытой диафрагмой для композитов и исходных нанотрубок: *a* — 2a; *b* — 2b; *c* — 2c; *d* — 2d.

ярко выражено для композита 2a и в меньшей степени — для композитов 2b и 2d.

3.2. Эффект оптического ограничения

Свойства ограничителя лазерного излучения позволяет изучить кривая оптического ограничения, которая в нашем исследовании получалась на основе измерений нелинейного пропускания при фиксированном расположении материала относительно фокуса линзы. Для измерений был выбран диапазон от 0.04 до 15 J/cm^2. Для комплексов фталоцианинов 1a–c в ДМФА заметного отклонения от линейной зависимости не обнаружено, что связано с относительно небольшим значением нелинейного коэффициента поглощения β (рис. 6). В противоположность исходным красителям 1a–c, в случае композитов 2a–c кривые оптического ограничения показывают ярко выраженное отклонение от линейной зависимости. Никелевый композит 2c проявляет наименьшее ослабление, на что указывает наличие слабой нелинейности. На рис. 7 представлены результаты иссле-

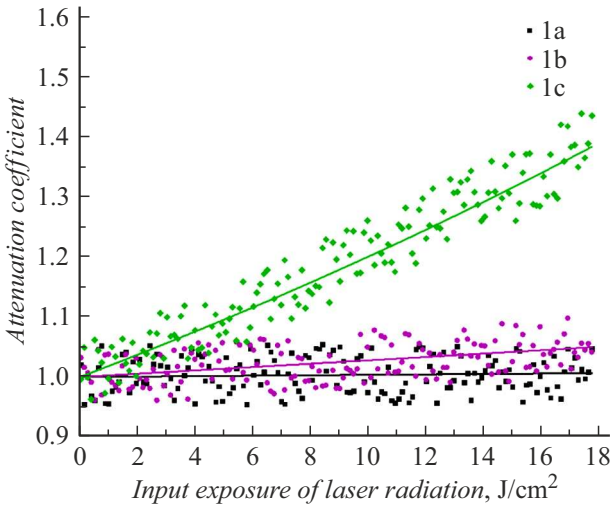

Рис. 6. Зависимость коэффициента ослабления от падающей экспозиции лазерного излучения для комплексов фталоцианинов 1a–1c в ДМФА.

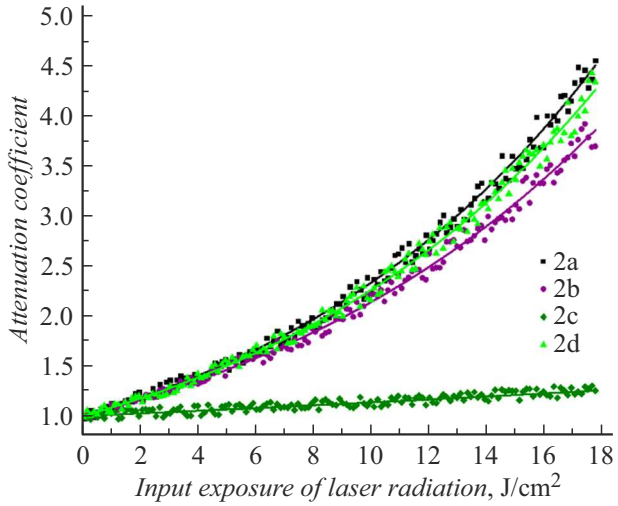

Рис. 7. Зависимость коэффициента ослабления от падающей экспозиции лазерного излучения для композитов и нанотрубок 2a–2d.

дований дисперсных сред композитов 2a–c и свободных ОУНТ (2d).

3.3. Результаты

Для проведения корреляционного анализа необходимо воспользоваться выражениями (4)–(7), подставив в них значения в размерностях из таблицы.

На рис. 8, *a* видно, как нелинейные поглотители группируются в отдельные зоны. Согласно граничным условиям для σ_1 и σ_2, материалы 2a,b,d, отнесенные к группе „strong“, на практике могут демонстрировать наилучшие НЛО свойства, приемлемые для создания высокоскоростных оптических лимитеров. В свою очередь, материалы 1a–c и 2c находятся на одной линии. По этой причине необходимо смотреть в билогарифмическую шкалу (рис. 8, *b*), которая позволяет выпрямить образовавшуюся неопределенную нелинейность. В итоге оказывается, что материалы 1b,c и 2c занимают промежуточную позицию по эффективности и должны быть отнесены к группе „medium“, а самыми приемлемыми для конструкторских решений могут стать наноматериалы 2a,b,d. Из билогарифмического анализа также следует, что если материал попадает в область отрицательных значений θ_1 и θ_2, его свойства на практике скорее всего окажутся малопривлекательными и относятся к серии „weak“. Обнаружен интересный факт, что в то время, как фталоцианин железа 1a, сам по себе, обладает наименьшей активностью в оптическом лимитировании, после его присоединения к ОУНТ конечный материал становится более активным. Та же закономерность справедлива и для кобальтового комплекса 1b, который после адсорбции на поверхности ОУНТ покидает желтую зону (рис. 8, *b*). А вот для никелевого фталоцианина 1c объединение с нанотрубками существенного выигрыша не дает. Отсюда мы заключаем, что композиты фталоцианинов с ОУНТ, хоть в большинстве случаев и дают увеличение активности в оптическом лимитировании, однако сама такая аддукция вовсе не гарантирует желаемый результат.

Заключение

В работе создано три композита 2a, 2b и 2c для которых произведено исследование свойств по оптическому лимитированию. В результате оценки их эффективности новейшими корреляционными методами установлено, что фталоцианиновый комплекс железа с ОУНТ 2a, проявляет лучшее сочетание нелинейных оптических параметров: линейное пропускание 0.77, нелинейный коэффициент поглощения 2800 cm·GW^{-1}, динамический диапазон 260, пороговая экспозиция лазерного излучения 0.07 J/cm^2 и коэффициента ослабления 4.35. Это выявлено при сравнении подготовленных материалов по значениям дескрипторов σ_2 и σ_1 по результатам зонного параметрического анализа, который был дополнен билогарифмической шкалой θ_2 и θ_1, которые связаны с σ_2 и σ_1 приведенными в работе соотношениями. Анализ

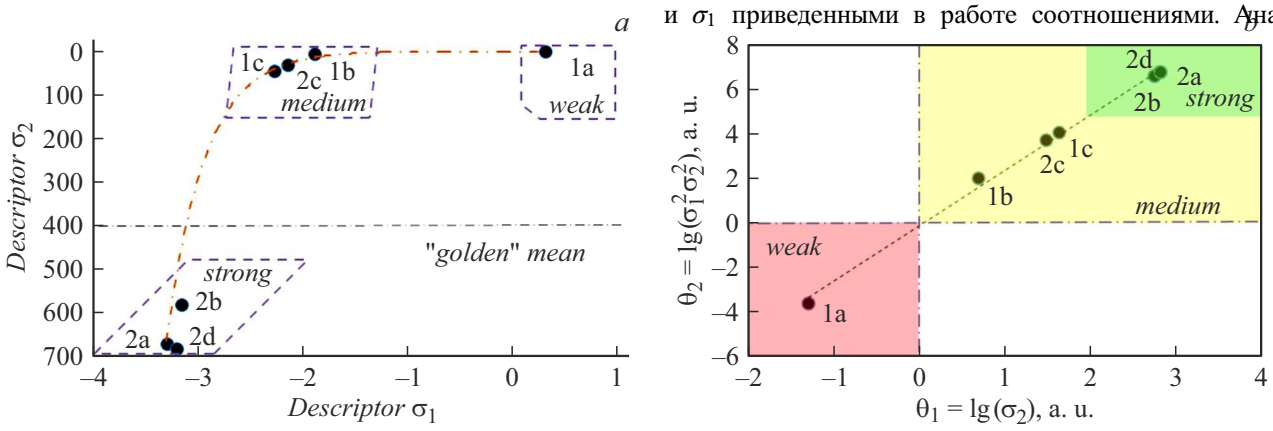

Рис. 8. Зонный параметрический анализ эффективности ограничителей лазерного излучения на основании выражений (4)–(7): *a* — соотношение дескрипторов σ_2 *vs* σ_1; *b* — проверка справедливости корреляции в билогарифмической шкале (θ_2 *vs* θ_1) с целью уточнения результата.

с использованием только величин σ_2 и σ_1 является недостаточным. Также установлено, что среди фталоцианинов наилучшими свойствами по оптическому лимитированию обладает образец 1c. Выявленные современным высокопроизводительным методом CORRELATO материалы обладают наилучшими совокупными характеристиками оптического лимитирования и способны удовлетворять конструкторским требованиям для использования в составе ограничителей лазерного излучения в качестве рабочего вещества.

Финансирование работы

Экспериментальные исследования нелинейных оптических параметров разработанных материалов выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки России (Проект FSMR-2024-0003). Синтез фталоцианинов выполнен в соответствии с темой FFSG-2024-0019 (2024-2028 гг.) „Создание инновационных функциональных соединений и наноматериалов на основе фотоактивных макроциклов, фосфорорганических производных и аэрогелей для технических и медицинских приложений с использованием экспериментальных и расчетных методов“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J.-A. Beraldin. Opt. Eng., **39**, 196 (2000). DOI: 10.1117/1.602352
[2] C. Jiang, Y. Chen, W. Tian, Z. Feng, W. Li, C. Zhou, H. Shao, E. Puttonen, J. Hyyppä. Satell. Navig., **1**, 29 (2020). DOI: 10.1186/s43020-020-00029-5
[3] R. Roriz, J. Cabral, T. Gomes. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., **23**, 6282 (2022). DOI: 10.1109/TITS.2021.3086804
[4] Y. Guan, H. Li, L. Xue, R. Yin, L. Zhang, H. Wang, G. Zhu, L. Kang, J. Chen, P. Wu. Opt. Lasers Eng., **156**, 107102 (2022). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2022.107102
[5] C. Hong, S.-H. Kim, J.-H. Kim, S.M. Park. IEEE Sens. J., **18**, 7032 (2018). DOI: 10.1109/JSEN.2018.2852794
[6] C. Westgate. *How to Determine the Laser-Induced Damage Threshold of 2D Imaging Arrays* (SPIE, 2019), v. SL47, p. 25. DOI: 10.1117/3.2523509
[7] T. Alig, N. Bartels, P. Allenspacher, I. Balasa, T. Böntgen, D. Ristau, L. Jensen. Opt. Express., **29**, 14189 (2021). DOI: 10.1364/OE.418368
[8] N. Bartels, P. Allenspacher, T. Alig, I. Balasa, H. Schröder, G. Taube, W. Riede. *Proceedings of International Conference on Space Optics — ICSO 2020* (SPIE, 2020), v. 11852, p. 215. DOI: 10.1117/12.2600036
[9] Y. Shi, J. Zhang, W. Xue, Z. Xu, Y. Li, P. Dou, G. Feng. *Proceedings of Sixth International Symposium on Laser Interaction with Matter* (SPIE, 2022), v. 12459, p. 49. DOI: 10.1117/12.2656210
[10] P.N. Vasilevsky, M.S. Savelyev, A.Y. Tolbin, A.V. Kuksin, Y.O. Vasilevskaya, A.P. Orlov, Y.P. Shaman, A.A. Dudin, A.A. Pavlov, A.Y. Gerasimenko. Photonics, **10**, 537 (2023). DOI: 10.3390/photonics10050537
[11] A.Y. Tolbin, M.S. Savelyev, P.N. Vasilevsky, A.Y. Gerasimenko. Phys. Chem. Chem. Phys., **26**, 8965 (2024). DOI: 10.1039/D4CP00055B
[12] S. Mgidlana, P. Şen, T. Nyokong. J. Mol. Struct., 1220, 128729 (2020). DOI: 10.1016/j.molstruc
[13] H. Zhang, L. Li, J. Chen, J. Wang, Y. Liu, H. Zhang, Q. Wang, S. Wang, G. Yang. Dye. Pigment., **219**, 111553 (2023). DOI: 10.1016/j.dyepig.2023.111553
[14] M. Erdem, E. Korkmaz, G. Kösoğlu, E. Ahmetali, N. Farajzadeh, G. Eryürek, M.B. Koçak. Polyhedron., **195**, 114975 (2021). DOI: 10.1016/j.poly.2020.114975
[15] H. Manaa, D. Attila, A.G. Gürek, S. Mohamed, F.A. Alawainati, A. Jaafar, F.Z. Henari. Opt. Spect., **129**, 628 (2021). DOI: 10.1134/S0030400X21050064
[16] D. Zhang, Y. Wang, X. Meng, H. Ni, Y. Wang, D. Liu, G. Wang, Y. Chen. J. Phys. Chem. A., **128**, 6402 (2024). DOI: 10.1021/acs.jpca.4c02962
[17] J. Wang, W. Dong, Z. Si, X. Cui, Q. Duan. Dye. Pigment., **198**, 109985 (2022). DOI: 10.1016/j.dyepig.2021.109985
[18] A.U. Habeeba, M. Saravanan, T.C.S. Girisun. J. Mol. Struct., **1240**, 130559 (2021). DOI: 10.1016/j.molstruc
[19] W. Li, Z. Zhang, Y. Li, Y. Huang, J. Zhang, M. You, P. Peng, C. Zheng. J. Lumin., **275**, 120754 (2024). DOI: 10.1016/j.jlumin.2024.120754
[20] K. Balasubramanian, M. Burghard. Small., **1**, 180 (2005). DOI: 10.1002/smll.200400118
[21] J. Chen, A.M. Rao, S. Lyuksyutov, M.E. Itkis, M.A. Hamon, H. Hu, R.W. Cohn, P.C. Eklund, D.T. Colbert, R.E. Smalley, R.C. Haddon. J. Phys. Chem. B, **105**, 2525 (2001). DOI: 10.1021/jp002596i
[22] D.A. Britz, A.N. Khlobystov. Chem. Soc. Rev., **35**, 637 (2006). DOI: 10.1039/b507451g
[23] G. Bottari, G. De La Torre, T.T. Torres. Acc. Chem. Res., **48**, 900 (2015). DOI: 10.1021/ar5004384
[24] F. Mashkoor, A. Nasar, Inamuddin., Environ. Chem. Lett., **18**, 605 (2020). DOI: 10.1007/s10311-020-00970-6
[25] B.I. Kharisov, O.V. Kharissova, A.V. Dimas. RSC Adv., **6**, 68760 (2016). DOI: 10.1039/C6RA13187E
[26] E.K. Silva, A.L.R. Costa, A. Gomes, M.A. Bargas, R.L. Cunha, M.A.A. Meireles. Ultrason. Sonochem., **47**, 114 (2018). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.04.020
[27] A.Yu. Tolbin. *Establishing Correlations between Unlimited Datasets* (Correlato, Certificate of State Registration of Computer Program No 2022613888 (Ru), 2022)
[28] A.Y. Tolbin, M.S. Savelyev, A.Y. Gerasimenko, V.E. Pushkarev. ACS Omega, **7**, 28658 (2022). DOI: 10.1021/acsomega.2c03928