

09

## Нелинейное оптическое ограничение мощности лазерного излучения в ультрафиолетовом и видимом диапазонах бис-фталоцианинами clamshell типа

© М.С. Савельев,<sup>1,2</sup> П.Н. Василевский,<sup>1,3</sup> А.А. Дудин,<sup>3</sup> А.П. Орлов,<sup>3,4</sup> Ю.П. Шаман,<sup>3</sup> А.Ю. Толбин,<sup>5</sup>  
А.Ю. Герасименко,<sup>1,2</sup> А.А. Павлов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,  
124498 Зеленоград, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт бионических технологий и инжиниринга, Первый МГМУ им. И.М. Сеченова,  
119991 Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН,  
119991 Москва, Россия

<sup>4</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
125009 Москва, Россия

<sup>5</sup> Институт физиологически активных веществ Федерального исследовательского центра  
проблем химической физики и медицинской химии РАН,  
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия  
e-mail: saveliyev@bms.zone

Поступило в Редакцию 23 декабря 2023 г.

В окончательной редакции 23 декабря 2023 г.

Принято к публикации 23 декабря 2023 г.

Лазерное излучение в ультрафиолетовом и видимом диапазонах представляет высокую опасность для глаз. При попадании луча с высокой плотностью потока энергии возникает повреждение тканей глаза вплоть до необратимых повреждений роговицы или хрусталика, а в случае видимого диапазона происходит разрушение участков сетчатки глаза. Опасный уровень излучения достигается наносекундными импульсами, что затрудняет возможность использования активных средств защиты. За время, меньшее длительности импульса, ослабление лазерного излучения обеспечивается использованием нелинейных оптических материалов, в качестве которых исследованы бис-фталоцианины clamshell-типа — металлокомплексы **1a, b** (**a** — Zn, **b** — Mg) и исходный лиганд **2**. Эксперименты проведены в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра на длинах волн 355, 405 и 532 nm. При помощи корреляционного метода оценки эффективности оптического лимитирования (алгоритм CORRELATO) показано, что металлокомплексы имеют приоритет над лигандом, при этом максимальная эффективность обнаружена для цинкового комплекса **1a** в УФ области.

**Ключевые слова:** оптическое ограничение, фталоцианины, Z-сканирование, нелинейные поглотители.

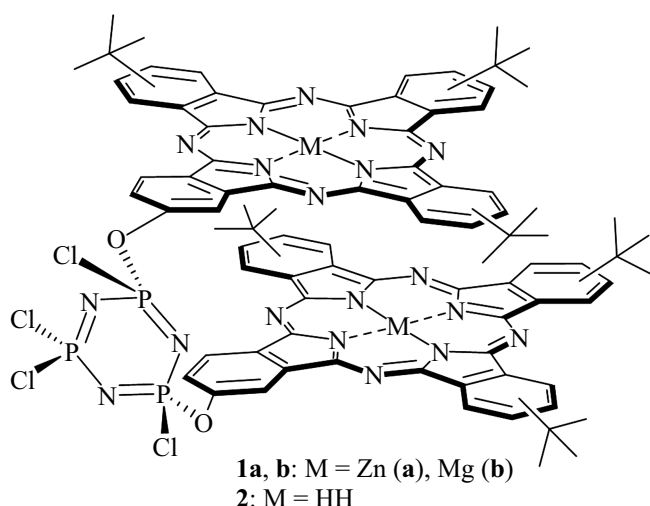
DOI: 10.61011/JTF.2024.03.57383.315-23

### Введение

Актуальность современных фундаментальных научных исследований в нелинейной оптике обоснована активным развитием технологий и инженерных решений, использующих лазерное излучение высокой интенсивности (лазерные лидары [1,2], высотомеры-дальномеры [3], целеуказатели [4], локационные системы [5], промышленные и медицинские установки [6–8]). Спектральный диапазон работы лазерных приборов простирается от 350 до 1100 nm, при этом ультрафиолетовое (УФ) излучение представляет опасность для органов зрения в том отношении, что оно не активизирует защитный моргательный рефлекс [9]. В результате такого воздействия может происходить необратимое повреждение роговицы или хрусталика глаза [10]. Для излучения в видимом диапазоне характерна меньшая энергия фотона, но такое излучение дополнительно фокусируется на сетчатке глаза и достигает высоких значений плотности потока

энергии [11]. Для ослабления лазерного излучения за время, меньшее длительности наносекундного импульса, разрабатываются различные нелинейные оптические материалы [12,13]. Для создания пассивных средств защиты необходимо, чтобы материал затемнялся при достижении опасного уровня плотности потока энергии.

подавляющее большинство лазерных приборов работает в видимой и ближней ИК областях спектра, что объясняется как использованием надежных твердотельных лазеров с генерацией дополнительных гармоник [14,15], так и фотоприемного оборудования для регистрации излучения [16], а также особенностями распространения излучения в атмосфере [17]. Высокие мощности современных лазерных установок требуют создания материалов и устройств для защиты фотоприемных матриц и органов зрения от повреждения при воздействии лазерного излучения высокой интенсивности в спектральном диапазоне от 350 до 1100 nm. В связи с этим важной задачей является оценка нелинейных



**Рис. 1.** Структурные формулы бимacroциклических красителей для оптических лимитеров.

оптических свойств именно в УФ диапазоне, так как из-за высокой энергии фотонов часто наблюдается эффект насыщенного поглощения [18–20], а для создания ограничителя лазерного излучения необходим эффект обратного насыщаемого поглощения [21].

## 1. Материалы и методы исследований

Для проведения исследований синтезированы бисфталочианинаты цинка (**1a**) и магния (**1b**), макроциклы которых сочленены циклотрифосфазеновым спейсером (рис. 1), а также предшественник — лиганд **2**. С целью установить влияние металла (или его отсутствие) на нелинейно-оптические (НЛО) свойства красителей в оптическом лимитировании.

Экспериментальное исследование НЛО свойств красителей **1,2** проведено методом Z-сканирования с открытой апертурой [9,12,21] и контролем длительности импульса после прохождения через оптическую среду, по аналогии с ранее использованной методикой [9]. Оценка эффективности красителей в оптическом лимитировании осуществлялась методом корреляционного анализа, включающего в себя две координаты — агрегацию ( $\sigma_1$ ) и НЛО отклик ( $\sigma_2$ ) с точки зрения квантовой механики. Соответствующие аналитические выражения приведены ниже.

### 1.1. Материалы

Синтез металлокомплексов **1a,b** осуществлялся по аналогии с предшественником — лигандом **2** по методике [22], исходя из соответствующих 2-гидроксифталочианинов [23,24]. К растворам цинкового и магниевого комплексам 2-гидроксифталочианина (0.1 mmol) в абсолютном бензоле (5 ml) добавили гидрид натрия (0.3 mmol). После непродолжительного перемешивания

к реакционным смесям был добавлен гексахлорциклотрифосфазен (0.25 mmol). Целевые комплексы **1a,b** после выделения на Bio-Beads SX-1 (BIORAD®) были получены с выходами около 25%.

### 1.2. Z-сканирование с открытой диафрагмой

Подготовленные образцы исследованы методом Z-сканирования [25–27] с открытой диафрагмой. Для исследований в УФ и видимом диапазонах длин волн использовались лазеры LS2147 (Lotis Tii, Белоруссия) и LS2145-ОРО (Lotis Tii, Беларусь) в качестве источников излучения. Схема эксперимента представлена на рис. 2. Полная энергия импульса 500  $\mu\text{J}$  (532 nm) выбиралась так, чтобы на кривой Z-сканирования с открытой диафрагмой просматривались участки с пропусканием, равным линейному вдали от перетяжки. По этой же причине на длине волны лазерного излучения 355 и 405 nm использовался импульс с энергией 300  $\mu\text{J}$ . При данном методе исследований меняется именно плотность потока энергии, которая попадает на образец. Энергетический импульс увеличивается вследствие фокусировки лазерного излучения, а образец при этом перемещается вдоль направления распространения луча моторизованной подвижкой 8MT50-200BS1 (Standa, Литва), и регистрируются значения прошедшей полной энергии импульса при каждом фиксированном положении образца относительно фокуса линзы энергетическим детектором PD10 (Ophir, Израиль). Система, объединяющая собой осциллограф DSOS604A (Keysight Technologies, США) и два фотоприемника OD-08A (Avesta, Российская Федерация), позволила контролировать длительность импульса до и после взаимодействия с исследованными образцами. Для точечной настройки полной энергии импульса использовался поляризационный моторизованный аттенюатор OAGP-10-S (Avesta, Российская Федерация).

## 2. Теория

Решение уравнения переноса излучения (УПИ) [21] для общей зависимости коэффициента поглощения  $\mu$  от интенсивности  $I$  записывается выражением

$$\int_{I_0(\rho, \varphi, t)}^{I(\rho, \varphi, t)} \frac{1}{I\mu(I)} dI = -d, \quad (1)$$

где  $I_0$  — падающая интенсивность,  $\rho$  и  $\varphi$  — полярная система координат,  $t$  — время и  $d$  — толщина материала. При этом в ходе эксперимента определяются значения полной энергии импульса  $U$ , по которым рассчитываются значения нормированного пропускания  $T_{\text{norm}}$ . Интенсивность  $I$  в общем случае определяется полной энергией импульса формулой

$$I = UA(\rho)B(\varphi)C(t), \quad (2)$$

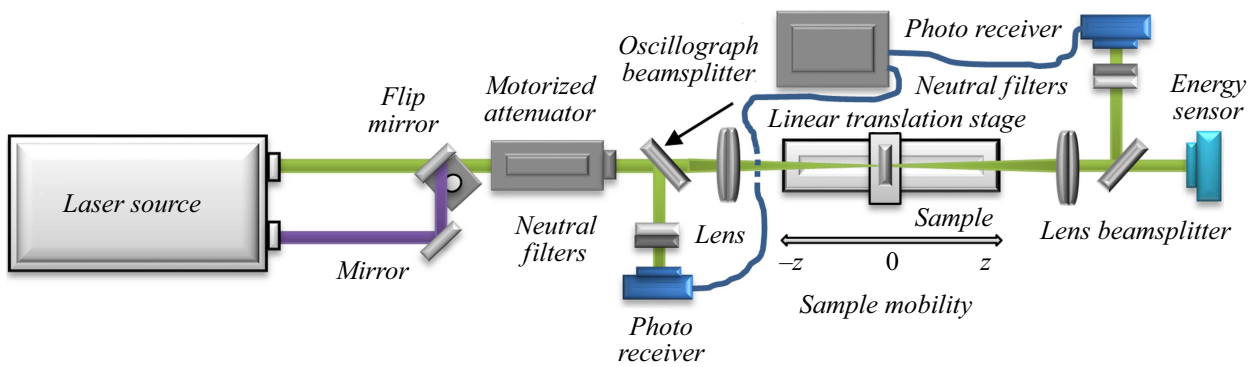


Рис. 2. Схема установки для выявления сред с нелинейными оптическими свойствами.

где  $A(\rho)$  — радиальный профиль импульса;  $\rho$  — расстояние от оси лазерного пучка;  $B(\varphi)$  — угловая зависимость профиля импульса;  $\varphi$  — угловая координата и  $C(t)$  — форма импульса по времени  $t$ .

Часто для обработки результатов экспериментов взаимодействия лазерного излучения с нелинейной средой, состоящей в аппроксимации взаимосвязей нормированного пропускания от интенсивности, используется постулат, что лазерные импульсы имеют Гауссову форму, и это дает возможность реализации множества теорий [21,28,29]. Однако получить решение в элементарных функциях не всегда возможно. В то же время замечено, что нелинейный оптический отклик слабо зависит от формы импульса и определяется в основном энергетическими параметрами лазера. Поэтому в расчетах целесообразно использовать выражения для прямоугольной формы импульса, для которой практически всегда может быть получено аналитическое решение:

$$\begin{cases} A(\rho) = \frac{1}{w^2\pi}, & 0 \leq \rho \leq w, \\ B(\varphi) = 1, & 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \\ C(t) = \frac{1}{\tau}, & 0 \leq t \leq \tau. \end{cases} \quad (3)$$

Значения нелинейного пропускания (отношение полных энергий прошедшего и падающего импульсов) в эксперименте нормируются на линейное пропускание (определяется линейным коэффициентом поглощения  $\alpha$ ) [30,31]. После включения пороговой интенсивности  $I_{thr}$  в выражение для коэффициента поглощения  $\mu(I)$  следующим образом:

$$\mu(I) = \alpha + \beta(I - I_{thr})\eta(I - I_{thr}), \quad (4)$$

и подстановки этого уравнения в (1) с учетом общего выражения для интенсивности (2) и характера распределения интенсивности импульса (3) получим формулу для определения нормированного пропускания из решения УПИ [21] в следующем виде:

$$T_{norm} = \exp\left(-\beta\left(\frac{U_0}{w^2\pi\tau} - I_{thr}\right)d\right), \quad (5)$$

где  $\beta$  — нелинейный коэффициент поглощения,  $I_{thr}$  — пороговая интенсивность,  $U_0$  — полная энергия падающего импульса,  $w$  — радиус луча,  $\tau$  — длительность импульса и  $\eta$  — функция Хевисайда, которая имеет значение 1 при интенсивности, превышающей пороговое значение, и 0 — при меньшей интенсивности.

В УФ диапазоне может наблюдаться эффект насыщенного поглощения [32–34], для которого характерно уменьшение линейного пропускания. В таком случае зависимость коэффициента поглощения задается интенсивностью насыщения  $I_s$  [18,35,36] и нелинейным коэффициентом поглощения по формуле [37–39]:

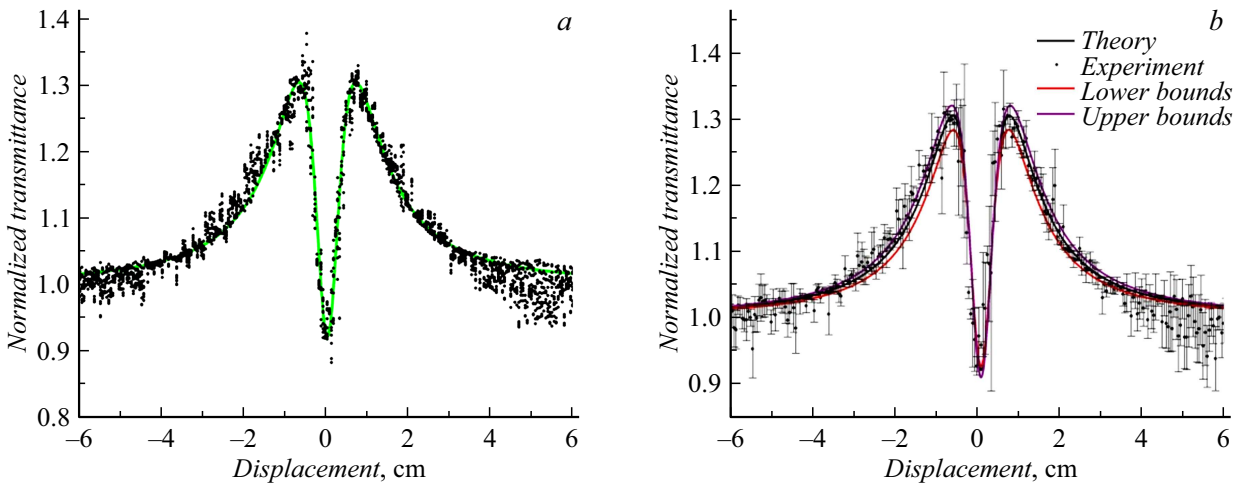
$$\mu(I) = \frac{\alpha I_s}{I_s + I} + \beta I. \quad (6)$$

Из решения УПИ получаем величину нормированного пропускания в случае зависимости коэффициента поглощения (6) для прямоугольной формы импульса (3) с учетом (2) в следующем виде:

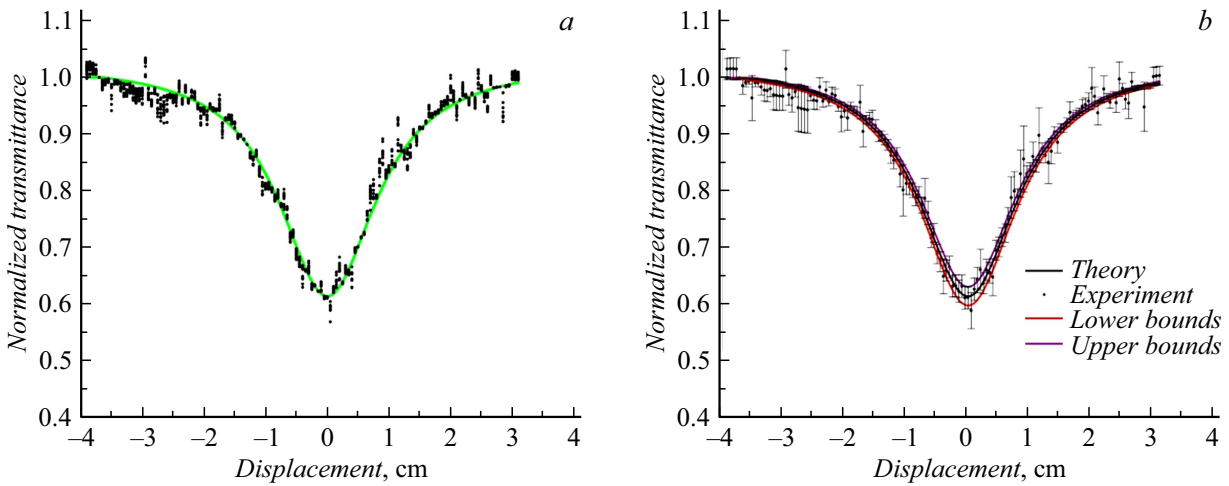
$$T_{norm} = \exp\left(-\left(\frac{\beta U_0}{w^2\pi\tau} - \frac{\alpha U_0}{I_s w^2\pi\tau + U_0}\right)d\right). \quad (7)$$

На рис. 3 приведена зависимость, полученная с помощью метода Z-сканирования с открытой диафрагмой на длине волны 355 nm для красителя **2**. Для эффекта насыщенного поглощения характерно увеличение нормированного пропускания. В каждой точке производилось 30 измерений. На рис. 3,а приведены данные по 10 точкам и проведена аппроксимация уравнением (7). На рис. 3,б приведены данные для стандартных измерений и указаны верхняя и нижняя границы доверительного интервала. Статистическое исследование погрешностей выполнено при 30 вычислительных экспериментах с применением  $t$ -критерия Стьюдента с уровнем значимости 0.01. Для безметалльного фталоцианина **2** линейный коэффициент поглощения ( $\alpha$ ) составил  $2.68 \pm 0.02 \text{ cm}^{-1}$ , нелинейный коэффициент поглощения  $\beta = 10 \pm 1 \text{ cm/GW}$  и интенсивность насыщения  $I_s = 0.06 \pm 0.01 \text{ GW/cm}^2$ .

На рис. 4 приведены данные Z-сканирования с открытой диафрагмой для бис-фталоцианина **1a** на длине



**Рис. 3.** Данные Z-сканирования с открытой диафрагмой для безметаллического фталоцианина **2**: *a* — приведены данные 10 измерений; *b* — теоретическая кривая и ее верхняя и нижняя границы доверительного интервала.



**Рис. 4.** Данные Z-сканирования с открытой диафрагмой для фталоцианина **1a**: *a* — приведены данные 10 измерений; *b* — теоретическая кривая и ее верхняя и нижняя границы доверительного интервала.

волны 405 nm, показывающие, что в случае цинкового комплекса **1a** насыщение поглощения не достигается. На рис. 4, *a* показаны результаты 10 измерений в каждой точке и проведена аппроксимация уравнением (5). В соответствии с этим выражением (5), полученным для пороговой зависимости коэффициента поглощения (4), определены значения:  $\beta = 97 \text{ cm/GW}$  и пороговой плотности потока энергии  $F_{\text{thr}} = 0.02 \text{ J/cm}^2$  для измеренной зависимости нормированного пропускания от смещения образца с указанием верхней и нижней границ доверительного интервала (рис. 4, *b*).

Для сравнения эффективности красителей в оптическом лимитировании использовались ранее созданные корреляционные модели, основанные на расчете дескрипторов  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  [12,40]:

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

$$\sigma_2 = \frac{k_A\beta}{\text{DR} \cdot F_{\text{thr}}}, \tag{9}$$

где  $k_A$  — коэффициент затухания,  $F_{\text{thr}}$  — пороговая плотность потока энергии, а DR — динамический диапазон.

Такой подход был необходим, поскольку в экспериментах концентрации красителей отличались, а параметры, входящие в эти выражения, согласованно влияют друг на друга. В предыдущих исследованиях нами было установлено, что чем сильнее значение  $\sigma_1$  сдвинуто в отрицательную область, тем меньше агрегация влияет на оптическое ограничение. В свою очередь, чем больше величина  $\sigma_2$ , тем выше нелинейно-оптический отклик красителя с точки зрения квантовой механики. Сочетание этих двух координат позволило нам в настоящей работе перейти к аналитическим выражениям, определяющим граничные условия для сортировки красителей по принципу „плохой–хороший“ в отношении агрегации

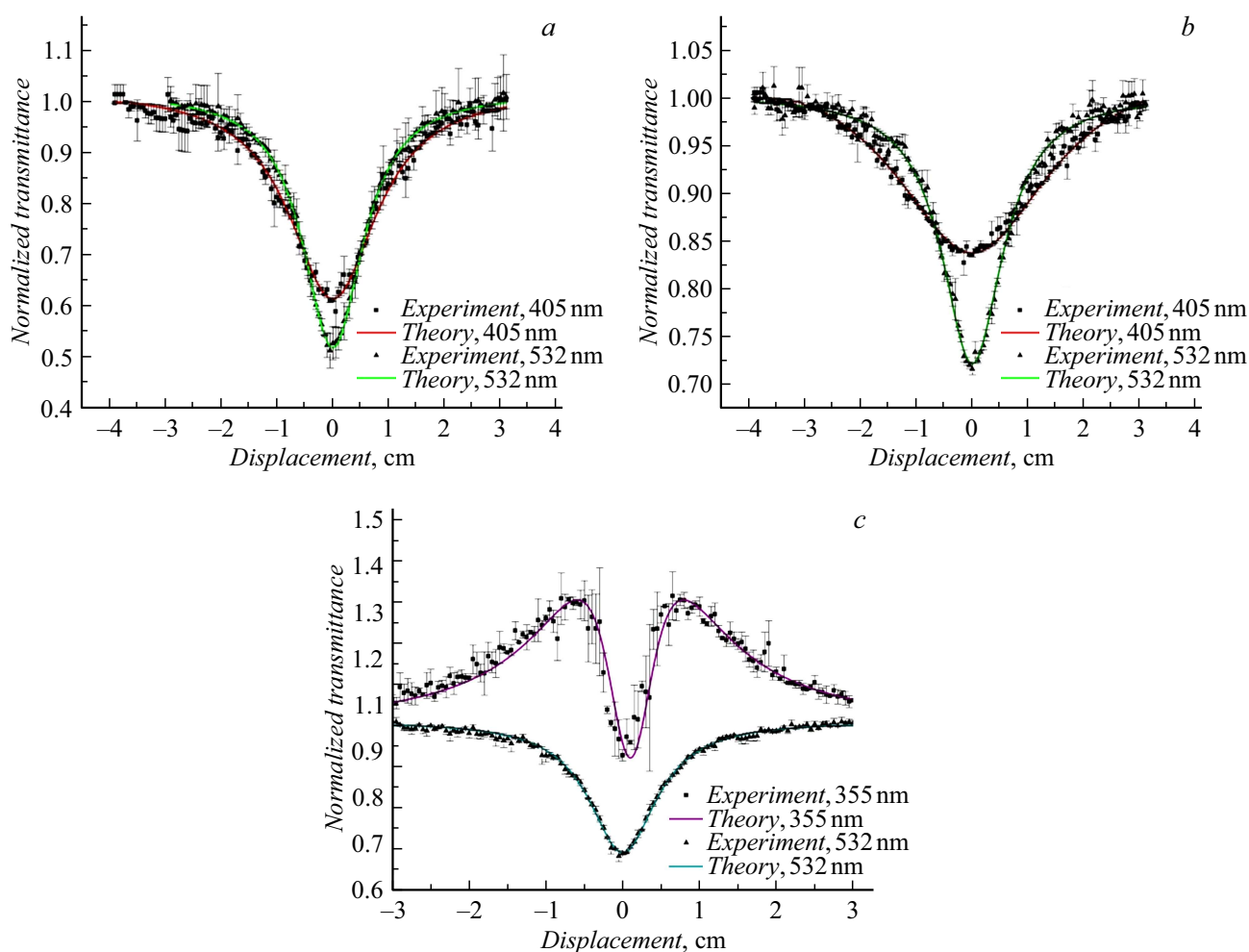


Рис. 5. Данные Z-сканирования с открытой диафрагмой для красителей: **1a** (a), **1b** (b), **2** (c).

и их НЛЮ характеристик для создания оптических лимитеров.

### 3. Эксперимент

Для фталоцианинов **1,2** проведены исследования на длинах волн 532 и 405 nm с длительностью импульсов 10 и 7 ns соответственно. Обнаружено изменение длительности импульса при смещении образца относительно фокуса линзы.

#### 3.1. Измерения нормированного пропускания по методу Z-сканирования с открытой апертурой

В видимом диапазоне наблюдается эффект только от процесса обратного насыщения поглощения, соответствующие данные приведены на рис. 5 для фталоцианинов **1a** (рис. 5, a) и **1b** (рис. 5, b) на длинах волн 405 и 532 nm. Для фталоцианина **2** в УФ диапазоне на длине волны 355 nm обнаружен как эффект насыщенного поглощения, так и обратного на-

сыщения поглощения (рис. 5, c). Для описания такого взаимодействия использована формула (6). На длине волны 532 nm для фталоцианина **2** наблюдается эффект обратного насыщения поглощения. Обнаружено, что при приближении к фокусу линзы уменьшается длительность импульса, что показано на рис. 6 и 7 для длин волн 405 и 532 nm соответственно. На рис. 6, a и 7, a представлены результаты для фталоцианина **1a**, а на рис. 6, b и 7, b данные для фталоцианина **1b**.

При приближении образца к фокусу линзы и увеличении нелинейного поглощения обнаружено изменение ширины прошедшего импульса. После такого взаимодействия длительность импульса уменьшается примерно на 20%. Эффект изменения длительности импульса связан с обратным насыщением поглощения [41]. Сначала взаимодействие характеризуется линейным поглощением лазерного импульса в среде, и такой плотности потока энергии недостаточно, чтобы вызвать нелинейное поглощение. При приближении к фокусу наблюдается нелинейное взаимодействие, которое возникает во время взаимодействия с передней кромкой пучка, что

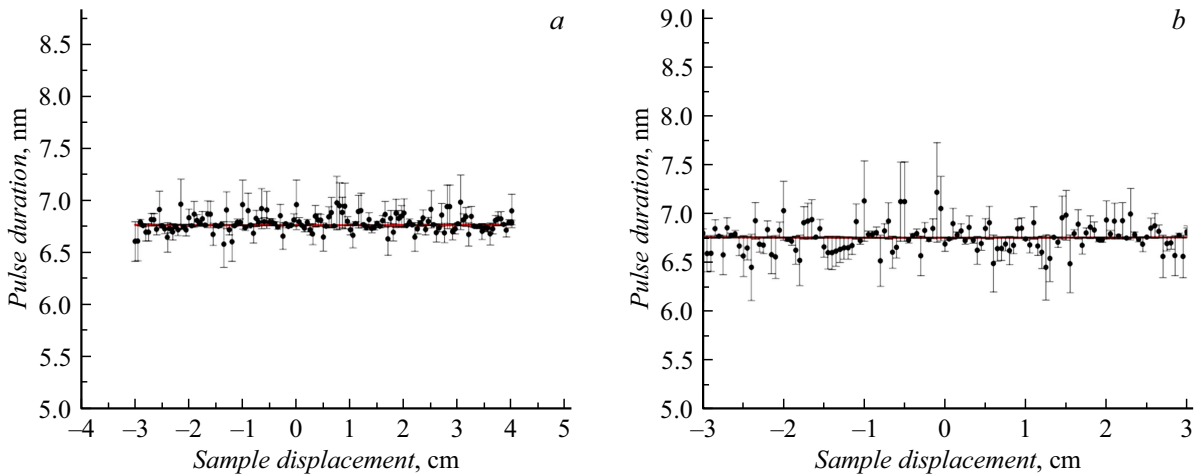


Рис. 6. Изменение длительности импульса на длине волны 405 nm для красителей: **1a** (a), **1b** (b).

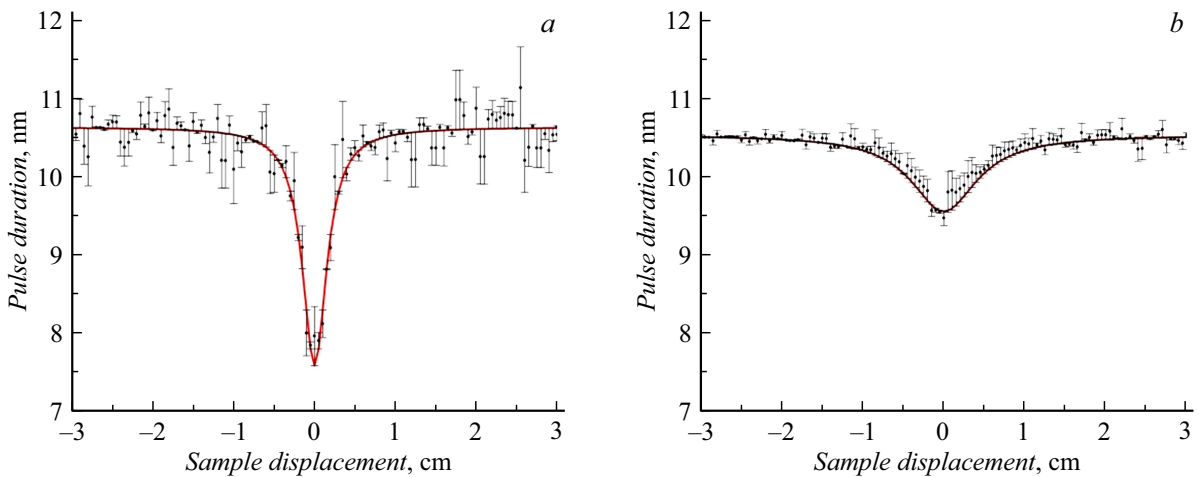


Рис. 7. Изменение длительности импульса на длине волны 532 nm для красителей: **1a** (a), **1b** (b).

сопровождается насыщением среды, вследствие чего при достаточной длительности наносекундного импульса, превышающей 1 ns, задняя кромка луча ослабляется сильнее. Задний фронт луча уже проходит через насыщенную среду и, таким образом, испытывает нелинейное поглощение. Вблизи фокуса плотность потока энергии становится достаточно высокой, чтобы передний фронт импульса испытал нелинейное поглощение, что приводит к резкому падению пиковой плотности потока энергии. Это в итоге начинает оказывать влияние на длительность импульса и в случае импульсов длительностью 10 ns на длине волны 532 nm заметно уменьшение интенсивности до 7.5 ns. Подобный эффект оказывает меньшее влияние при длительности импульсов менее 7 ns на длине волны 405 nm, вследствие чего не зафиксировано уменьшение длительности.

### 3.2. Результаты

Полученные данные измерений для бис-фталоцианинов **1,2** сгруппированы в таблицу. Толщина кюветы во

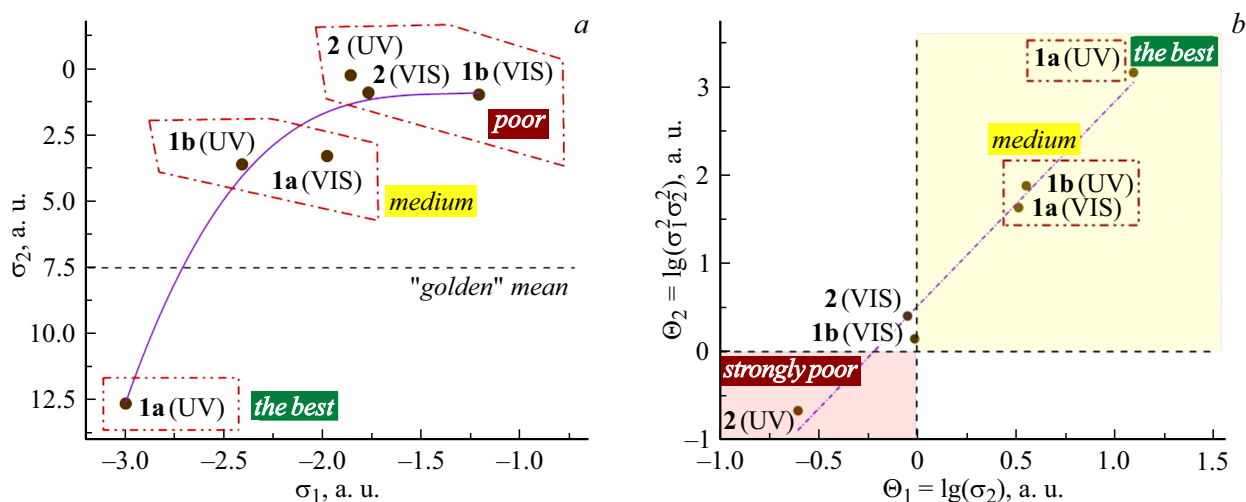
всех случаях составляла 3 mm. Получено требуемое ослабление лазерного излучения бис-фталоцианинами на длинах волн 405 и 532 nm при длительности импульсов 7 и 10 ns соответственно.

Показано, что взаимосвязь между дескрипторами  $\sigma_2$  и  $\sigma_1$  носит нелинейный характер, и это позволяет провести 2D-функциональный анализ эффективности оптического лимитирования в отношении агрегации и НЛО отклика (рис. 8, см. таблицу). Меткой „VIS“ обозначены исследования в видимом диапазоне длин волн, а метка „UV“ использована для обозначения УФ диапазона длин волн. Как следует из рис. 8, a, красители группируются в условные зоны. Опираясь на граничные условия усиления эффективности оптического лимитирования:  $\sigma_1 \rightarrow -\infty$ ,  $\sigma_2 \rightarrow +\infty$  [12,40], можно утверждать, что цинковый бис-фталоцианин **1a** обладает максимальной эффективностью в оптическом лимитировании в УФ области. Этот факт очень важен, поскольку явно демонстрирует участие *d*-оболочек металл-комплексобразователя в эффекте обратного насыщения поглощения, что подтверждается умеренным результа-

Данные для оценки эффективности оптического ограничения для бис-фталоцианинов **1,2**

| Образец   | $\lambda$ , nm | $\alpha$ , $\text{cm}^{-1}$ | $\beta$ , $\text{cm} \cdot \text{GW}^{-1}$ | $F_{\text{th}}$ , $\text{J}/\text{cm}^2$ | $k_A$         | DR           | $\sigma_1$ , a. u. | $\sigma_2$ , a. u. |
|-----------|----------------|-----------------------------|--|--|---------------|--------------|--------------------|--------------------|
| <b>2a</b> | $355 \pm 1$    | $2.7 \pm 0.1$               | $10 \pm 1$                                 | $1.00 \pm 0.01$                          | $1.1 \pm 0.1$ | $43 \pm 4$   | $-1.86$            | $0.25$             |
| <b>1a</b> | $405 \pm 1$    | $3.2 \pm 0.1$               | $97 \pm 5$                                 | $0.02 \pm 0.01$                          | $2.3 \pm 0.1$ | $880 \pm 70$ | $-3.00$            | $12.64$            |
| <b>1b</b> | $405 \pm 1$    | $2.3 \pm 0.1$               | $49 \pm 4$                                 | $0.21 \pm 0.02$                          | $1.3 \pm 0.1$ | $84 \pm 7$   | $-2.41$            | $3.61$             |
| <b>2</b>  | $532 \pm 1$    | $1.6 \pm 0.1$               | $23 \pm 3$                                 | $0.04 \pm 0.01$                          | $1.5 \pm 0.1$ | $960 \pm 80$ | $-1.77$            | $0.90$             |
| <b>1a</b> | $532 \pm 1$    | $1.3 \pm 0.1$               | $56 \pm 4$                                 | $0.05 \pm 0.01$                          | $2.0 \pm 0.1$ | $680 \pm 50$ | $-1.98$            | $3.30$             |
| <b>1b</b> | $532 \pm 1$    | $0.8 \pm 0.1$               | $24 \pm 3$                                 | $0.04 \pm 0.01$                          | $1.4 \pm 0.1$ | $850 \pm 70$ | $-1.21$            | $0.98$             |

Примечание.  $^a F_s = 2.12 \text{ J}/\text{cm}^2$  для фталоцианина **2**.



**Рис. 8.** Функциональный (a) и зонный параметрический (b) анализ эффективности оптического лимитирования на основе агрегации красителей и их НЛО отклика. Подстановка значений в формулы (7), (8) осуществлялась в размерностях, указанных в таблице. Пунктирной линией показана „золотая середина“: эффективность возрастает при смещении из верхней части графика в нижний.

том для магниевого комплекса **1b**, у которого  $3d$ -уровень лежит выше занятых  $2s$ -орбиталей и к тому же свободен. Полученный результат также можно обосновать хорошо известным фактом наличия электронных переходов металл $\leftrightarrow$ лиганд, которые проявляются именно в УФ области [42]. Значение дескриптора  $\sigma_2$  для лиганда **2** в УФ области стремится к нулю. Это означает уменьшение эффективности лимитирования в отношении НЛО свойств красителя. Поскольку это ослабление происходит явно быстрее, чем негативное влияние агрегации на лимитирование (дескриптор  $\sigma_1$ ), то параметрическая функция „загибается“. Отсюда мы делаем вывод, что НЛО характеристики красителей имеют приоритет над агрегацией. Из рис. 8, a также следует, что красители **1,2** в видимой области несколько разочаровывают ожидания, занимая область выше условной „золотой“ середины. На рис. 8, b показан результат работы алгоритма CORRELATO [40], который позволил не только выстроить все красители в „линию“, но и сформулировать конкретные граничные условия эффективности оптического лимитирования. Условиями фильтрации служат

выражения:  $\theta_1 = \lg(\sigma_2) > 0$  и  $\theta_2 = \lg(\sigma_1^2 \sigma_2^2) > 0$ . В этом случае мы имеем дело с более высокой производительностью лимитирования, и она тем выше, чем дальше по диагонали вверх смещены сигналы. Иначе абсорберы окажутся малоэффективными, и это может не удовлетворять конструкторским требованиям. Еще раз отметим, что параметры оптического лимитирования:  $\beta$ ,  $F_{\text{th}}$ ,  $k_A$  и DR взаимосвязаны не только между собой, но и с концентрацией красителя (параметр  $\alpha$ ). Поэтому нельзя оперировать их абсолютными значениями. Метод оценки эффективности красителей в оптическом лимитировании, который мы здесь используем, позволяет оценить вклад перечисленных параметров в совокупности и в дальнейшем послужит обобщенной характеристикой НЛО материалов для оптических лимитеров.

## Заключение

При помощи уравнений для функционального и зонного параметрического анализа эффективности оптического лимитирования на основе агрегации красителей

и НЛО отклика с точки зрения квантовой механики, выведенные нами ранее в работах [12,40], показано, что в плане создания оптических лимитеров для УФ диапазона максимальной эффективностью должен обладать цинковый бис-фталоцианин **1a**, макроциклы которого сочленены циклотрифосфазеновым спейсером (рис. 1). Нелинейная взаимосвязь дескрипторов, отвечающих за эффективность лимитирования, демонстрирует тот факт, что НЛО свойства материалов имеют приоритет над агрегацией. На основе взаимосвязи дескрипторов  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , уравнения (8) и (9) соответственно, получены строгие граничные условия для сортировки красителей в отношении их эффективности в оптическом лимитировании. Также показано, что синтезированные красители будут работать лучше в УФ диапазоне при сравнении их суммарной эффективности с видимой областью спектра.

### Финансирование работы

Исследования выполнены при поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации (Государственный контракт № 20411.1950192501.11.003 от 29.12.2020. идентификатор 17705596339200009540).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] T. Fahey, M. Islam, A. Gardi, R. Sabatini. *Atmosphere (Basel)*, **12** (7), 918 (2021). DOI: 10.3390/atmos12070918
- [2] С.В. Алимов, О.Б. Данилов, А.П. Жевлаков, С.В. Кащеев, Д.В. Косачев, А.А. Мак, С.Б. Петров, В.И. Устюгов. *Оптич. журн.*, **76** (4), 41 (2009). [S.V. Alimov, D.V. Kosachev, O.B. Danilov, A. Zhevlakov, S.V. Kashcheev, A. Mak, S.B. Petrov, V.I. Ustyugov. *J. Opt. Technol.*, **76** (4), 199 (2009). DOI: 10.1364/JOT.76.000199]
- [3] C. Candan, M. Tiken, H. Berberoglu, E. Orhan, A. Yeniay. *Appl. Sci.*, **11** (1), 403 (2021). DOI: 10.3390/app11010403
- [4] V. Molebny, P. McManamon, O. Steinvall, T. Kobayashi, W. Chen. *Opt. Eng.*, **56** (3), 031220 (2016). DOI: 10.1117/1.OE.56.3.031220
- [5] H. Li, S. Chen, L. You, W. Meng, Z. Wu, Z. Zhang, K. Tang, L. Zhang, W. Zhang, X. Yang, X. Liu, Z. Wang, X. Xie. *Opt. Express*, **24** (4), 3535 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.003535
- [6] Y. Wang, Y. Zhao, L. Qu. *J. Energy Chem.*, **59**, 642 (2021). DOI: 10.1016/j.jechem.2020.12.002
- [7] A.H.A. Lutey, A. Fortunato, A. Ascari, S. Carmignato, C. Leone. *Opt. Laser Technol.*, **65**, 164 (2015). DOI: 10.1016/j.optlastec.2014.07.023
- [8] F. Hajiesmaeilbaigi, H. Razzaghi, M. Mahdizadeh, M.R.A. Moghaddam, M. Ruzbehani. *Opt. Laser Technol.*, **43** (8), 1428 (2011). DOI: 10.1016/j.optlastec.2011.04.013
- [9] 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** (5), 537 (2023). DOI: 10.3390/photonics10050537
- [10] L. Lazov, R. Teirumnieks, Edmunds Singh Ghalot, J. Def. *Manag.*, **11** (4), 1 (2021). DOI: 10.35248/2167-0374.21.11.210
- [11] Y. Barkana, M. Belkin. *Surv. Ophthalmol.*, **44** (6), 459 (2000). DOI: 10.1016/S0039-6257(00)00112-0
- [12] A.Y. Tolbin, V.I. Shestov, M.S. Savelyev, A.Y. Gerasimenko. *New J. Chem.*, **47** (3), 1165 (2023). DOI: 10.1039/D2NJ05376D
- [13] A.Y. Tolbin, M.S. Savelyev, A.Y. Gerasimenko, V.E. Pushkarev. *ACS Omega*, **7** (32), 28658 (2022). DOI: 10.1021/acsomega.2c03928
- [14] R. Sabatini, M.A. Richardson, A. Gardi, S. Ramasamy. *Prog. Aerosp. Sci.*, **79**, 15 (2015). DOI: 10.1016/j.paerosci.2015.07.002
- [15] R. Nalcaci, S. Cokakoglu. *Eur. J. Dent.*, **07**, S119 (2013). DOI: 10.4103/1305-7456.119089
- [16] M. Garlinska, A. Pregowska, K. Masztalerz, M. Osial. *Futur. Internet.*, **12** (11), 179 (2020). DOI: 10.3390/fi12110179
- [17] G. Temporao, H. Zibinden, S. Tanzilli, N. Gisin, T. Aellen, M. Giovannini, J. Faist, J. von der Weid. *Quant. Inf. Comput.*, **8** (1), 1 (2008) DOI: 10.26421/QIC8.1-2-1
- [18] H. Wang, C. Ciret, C. Cassagne, G. Boudebs. *Opt. Mater. Express*, **9** (2), 339 (2019). DOI: 10.1364/OME.9.000339
- [19] K.S. Rao, R.A. Ganceev, K. Zhang, Y. Fu, G.S. Boltaev, P.S. Krishnendu, P.V. Redkin, C. Guo. *J. Nanoparticle Res.*, **20**, 285 (2018). DOI: 10.1007/s11051-018-4391-3
- [20] F. Zhang, Z. Wu, Z. Wang, D. Wang, S. Wang, X. Xu. *RSC Adv.*, **6** (24), 20027 (2016). DOI: 10.1039/C6RA01607C
- [21] M.S. Savelyev, A.Y. Gerasimenko, V.M. Podgaetskii, S.A. Tereshchenko, S.V. Selishchev, A.Y. Tolbin. *Opt. Laser Technol.*, **117**, 272 (2019). DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.04.036
- [22] A.Yu. Tolbin, V.K. Brel, V.E. Pushkarev. *Mendelevov Commun.*, **33** (1), 93 (2023). DOI: 10.1016/j.mencom.2023.01.029
- [23] A.Y. Tolbin, V.E. Pushkarev, I.O. Balashova, A.V. Dzuban, P.A. Tarakanov, S.A. Trashin, L.G. Tomilova, N.S. Zefirov. *New J. Chem.*, **38** (12), 5825 (2014). DOI: 10.1039/C4NJ00692E
- [24] A.Y. Tolbin, A.V. Dzuban, E.V. Shulishov, L.G. Tomilova, N.S. Zefirov. *New J. Chem.*, **40** (10), 8262 (2016). DOI: 10.1039/C6NJ01187J
- [25] M. Sheik-Bahae, A.A. Said, T.-H. Wei, D.J. Hagan, E.W. Van Stryland. *IEEE J. Quant. Electron.*, **26** (4), 760 (1990). DOI: 10.1109/3.53394
- [26] Z. Li, N. Dong, C. Cheng, L. Xu, M. Chen, J. Wang, F. Chen. *Opt. Mater. Express.*, **8** (5), 1368 (2018). DOI: 10.1364/OME.8.001368
- [27] A. Volpi, J. Kock, A.R. Albrecht, M.P. Hehlen, R.I. Epstein, M. Sheik-Bahae. *Opt. Lett.*, **46** (6), 1421 (2021). DOI: 10.1364/OL.419551
- [28] O. Muller, V. Pichot, L. Merlat, D. Spitzer. *Sci. Rep.*, **9**, 519 (2019). DOI: 10.1038/s41598-018-36838-7
- [29] A.A. Said, M. Sheik-Bahae, D.J. Hagan, T.H. Wei, J. Wang, J. Young, E.W. Van Stryland. *J. Opt. Soc. Am. B.*, **9** (3), 405 (1992). DOI: 10.1364/JOSAB.9.000405
- [30] S.J. Varma, J. Kumar, Y. Liu, K. Layne, J. Wu, C. Liang, Y. Nakanishi, A. Aliyan, W. Yang, P.M. Ajayan, J. Thomas. *Adv. Opt. Mater.*, **5** (24), 1700713 (2017). DOI: 10.1002/adom.201700713
- [31] M. Zhao, R. Peng, Q. Zheng, Q. Wang, M.-J. Chang, Y. Liu, Y.-L. Song, H.-L. Zhang. *Nanoscale*, **7** (20), 9268 (2015). DOI: 10.1039/C5NR01088H



- [32] G. Liang, L. Zeng, Y.H. Tsang, L. Tao, C.Y. Tang, P.K. Cheng, H. Long, X. Liu, J. Li, J. Qu, Q. Wen. *J. Mater. Chem. C*, **6** (28), 7501 (2018). DOI: 10.1039/C8TC00498F
- [33] S.-J. Ding, F. Nan, D.-J. Yang, X.-L. Liu, Y.-L. Wang, L. Zhou, Z.-H. Hao, Q.-Q. Wang. *Sci. Rep.*, **5**, 9735 (2015). DOI: 10.1038/srep09735.
- [34] Y. Feng, N. Dong, G. Wang, Y. Li, S. Zhang, K. Wang, L. Zhang, W.J. Blau, J. Wang. *Opt. Express*, **23** (1), 559 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.000559.
- [35] C. Lu, H. Xuan, Y. Zhou, X. Xu, Q. Zhao, J. Bai. *Photon. Res.*, **8** (9), 1512 (2020). DOI: 10.1364/PRJ.395870
- [36] P.A. Kurian, C. Vijayan, K. Sathiyamoorthy, C.S. Suchand Sandeep, R. Philip. *Nanoscale Res. Lett.*, **2**, 561 (2007). DOI: 10.1007/s11671-007-9099-8
- [37] A. Kumar, R. Kumar, N. Verma, A.V. Anupama, H.K. Choudhary, R. Philip, B. Sahoo. *Opt. Mater. (Amst)*, **108**, 110163 (2020). DOI: 10.1016/j.optmat.2020.110163
- [38] K. Wang, X. Zhang, I.M. Kislyakov, N. Dong, S. Zhang, G. Wang, J. Fan, X. Zou, J. Du, Y. Leng, Q. Zhao, K. Wu, J. Chen, S.M. Baesman, K.-S. Liao, S. Maharjan, H. Zhang, L. Zhang, S.A. Curran, R.S. Oremland, W.J. Blau, J. Wang. *Nat. Commun.*, **10**, 3985 (2019). DOI: 10.1038/s41467-019-11898-z.
- [39] P. Kumar, M. Chandra Mathpal, G. Jagannath, J. Prakash, J.-R. Maze, W.D. Roos, H.C. Swart. *Nanotechnology*, **32** (34), 345709 (2021). DOI: 10.1088/1361-6528/abfee6
- [40] A.Y. Tolbin. *Mendeleev Commun.*, **33** (3), 419 (2023). DOI: 10.1016/j.mencom.2023.04.038
- [41] H. Chu, Y. Li, C. Wang, H. Zhang, D. Li. *Nanophotonics*, **9**, 761 (2020). DOI: 10.1515/nanoph-2020-0085.
- [42] H.S. Nalwa. *Supramolecular Photosensitive and Electroactive Materials* (Academic press, San Diego, 2001)