

На правах рукописи

КОЛДУНОВ ЛЕОНИД МОДЕСТОВИЧ

НАВЕДЕННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ОРГАНИЧЕСКИМИ СОЕДИНЕНИЯМИ ФТАЛОЦИАНИНОВОГО РЯДА  
В КОМПОЗИТЕ НАНОПОРИСТОЕ СТЕКЛО - ПОЛИМЕР

(01.04.21 – лазерная физика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017 г.

Работа выполнена в Московском физико-техническом институте  
(государственном университете)

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук  
Колдунов Модест Федорович

Официальные оппоненты:

Наумов Андрей Витальевич, доктор физико-математических наук,  
федеральное государственное бюджетное учреждение науки Инсти-  
тут спектроскопии Российской академии наук, заведующий отделом  
молекулярной спектроскопии

Ануфрик Славамир Степанович, доктор физико-математических  
наук, учреждение образования «Гродненский государственный  
университет имени Янки Купалы», заведующий кафедрой лазерной  
физики и спектроскопии

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образова-  
тельное учреждение высшего образования «Национальный исследователь-  
ский Томский государственный университет»

Защита состоится «12» октября 2017 г. в 15 час. на заседании дис-  
сертационного совета Д 212.156.09 при Московском физико-техническом  
институте (государственном университете) по адресу: 141700, г. Долго-  
прудный Московская обл., Институтский пер. д.9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Мос-  
ковского физико-технического института (государственного университе-  
та), <https://mipt.ru/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук, доцент

Токунов Ю. М

**Актуальность темы.** Исследованию наведенного поглощения лазерного излучения органическими соединениями посвящено большое количество работ. Интерес к нему связан как с фундаментальными проблемами взаимодействия лазерного излучения с многоатомными молекулами, так и возможностью решения широкого круга практических задач квантовой электроники (создание ограничителей мощности лазерного излучения, элементов для самосинхронизации мод и др.). Научный и практический аспекты исследования тесно связаны между собой, так как понимание закономерностей наведенного поглощения является эффективным путем решения технических задач.

К настоящему времени, в результате многочисленных исследований, опубликованных в литературе, установлен ряд закономерностей наведенного поглощения. В частности показано, что механизм наведенного поглощения обусловлен каскадными переходами, причем оно реализуется как в синглетном, так и триплетном канале поглощения. Введены ряд эмпирических характеристик «качества» наведенного поглощения (контраст и др.). Подробно исследовано наведенное поглощение соединений фталоцианинового ряда. Показано, что для них характерен высокий контраст, низкий «порог» и короткое время срабатывания. Установлено, что введение тяжелого атома в макроцикл молекулы, аксиальный лиганд или периферийные заместители ведет к повышению контраста наведенного поглощения.

Для описания наведенного поглощения предложена феноменологическая пятиуровневая модель. Показано, что результаты численного расчета скоростных уравнений пятиуровневой модели не противоречат результатам экспериментального исследования наведенного поглощения.

С практической точки зрения предпочтительно, чтобы нелинейный оптический элемент был твердотельным, тогда как в большинстве работ исследование наведенного поглощения выполнено на жидких растворах. Сложность разработки твердотельной матрицы, для органических соединений обусловлена технологическими ограничениями, главный из которых – низкая температура деструкции органических соединений (обычно менее 250°C),

что сильно ограничивает выбор материала матрицы. В качестве таковых могут быть: полимеры, ормосилы (кремний – органические соединения), золь-гельные стекла, композит нанопористое стекло-полимер и ряд других. Сопоставление характеристик этих матриц, выполненное нами, показало, что наилучшими характеристиками для оптического элемента, активированного органическим соединением, является композит нанопористое стекло – полимер (далее – композит), который был выбран в качестве твердотельной матрицы.

Все же, несмотря на значительные успехи в понимании механизма и процессов наведенного поглощения, последовательное выявление ряда его закономерностей (таких, например, как, связь наведенного поглощения со структурой молекулы) встречала значительные трудности. Это обусловлено, прежде всего, отсутствием обоснованных количественных характеристик наведенного поглощения (определяющих параметров), позволяющих адекватно сравнивать его эффективность у различных соединений. Кроме того, с практической точки зрения, предпочтительным является твердотельный оптический элемент, тогда как подавляющее большинство исследований наведенного поглощения органических соединений выполнено в жидкой среде.

**Цели и задачи.** На основе последовательного анализа выявить физически обоснованные определяющие параметры, адекватно характеризующие наведенное поглощение. Экспериментально исследовать наведенное поглощение ряда органических соединений, в твердотельной композитной матрице и обосновать, что композит нанопористое стекло – полимер является перспективной матрицей для нелинейного оптического элемента квантовой электроники, активированного органическими соединениями.

**Научная новизна.** Получена теоретически и обоснована экспериментально двухпараметрическая зависимость, описывающая наведенное поглощение органических соединений в различных средах. Показано, что параметры этой зависимости (контраст и критическая интенсивность) адекватно характеризуют наведенное поглощение органических соединений. Критическая

интенсивность наведенного поглощения рассматривается впервые. Экспериментально определен контраст и критическая интенсивность наведенного поглощения для ряда органических соединений. Показано, что полимерный компонент композита характеризуется значительной нелинейной рефракцией, тогда как у композита нанопористое стекло - полимер нелинейная рефракция отсутствует. Измерен коэффициент нелинейной рефракции полимерной компоненты композита. Показано, что композитная матрица перспективна для разработки нелинейных оптических элементов, активированных соединениями фталоцианинового ряда. Лазерная прочность композита как в режиме однократного, так и многократного воздействия значительно превосходит интенсивность, при которой наблюдается насыщение поглощения соединений фталоцианинового ряда, введенных в композит, а также порога их фотодеструкции.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученная в работе двухпараметрическая зависимость пропускания от интенсивности лазерного излучения адекватно описывает наведенное поглощение органических соединений. Введенные определяющие параметры (контраст и критическая интенсивность) дают надежную основу для сопоставления наведенного поглощения органических соединений и указывают направление их модификации с целью получения требуемых свойств наведенного поглощения для оптических элементов квантовой электроники. Экспериментальные исследования композита нанопористое стекло – полимер показывают, что он является перспективной твердотельной матрицей для нелинейных оптических элементов квантовой электроники активированной органическими соединениями.

**Методология и методы исследования.** Представленные в диссертации исследования основаны на комплексном подходе сочетающим как теоретическое, так и экспериментальное исследование наведенного поглощения органических соединений. Теоретический анализ выполнен на основе последовательного исследования решения скоростных уравнений описывающих

наведенное поглощение. Экспериментальные исследования – на тщательном изучении зависимости затемнения от плотности мощности излучения и сопоставлении полученных данных с результатами теоретических расчетов. Эти исследования дополнены спектральными измерениями и тщательным контролем процедуры изготовления исследуемых экспериментально образцов.

**Основные положения, представляемые к защите:**

- Наведенное поглощение органических соединений описывается двухпараметрической зависимостью.
- Параметры этой зависимости, контраст и критическая интенсивность, полностью характеризуют механизм наведенного поглощения органических соединений.
- Для корректного измерения контраста и критической интенсивности наведенного поглощения органических соединений экспериментальное исследование зависимости его пропускания от интенсивности лазерного излучения должно быть выполнено в широкой области интенсивностей, включающей область насыщения поглощения.
- Полимерная компонента композита характеризуется значительной нелинейной рефракцией, тогда как композит нанопористое стекло – полимер в аналогичных условиях нелинейной рефракции не обнаруживает.
- Лазерная прочность композита значительно превосходит интенсивность насыщения поглощения и деструкции соединений фталоцианинового ряда.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность экспериментальных данных, полученных в работе, подтверждается апробированными методами измерения физических величин. Результаты теоретического исследования подтверждаются совпадением результатов расчета с экспериментальными данными, полученными как в данной работе, так и приведенными в литературе. Соответствие экспериментальных и теоретических

данных удовлетворяет критериям их соответствия, полученных в работе. Основные результаты работы доложены на Международных конференциях ICONO/LAT(2010 г., Россия, Казань), ALT'13 (2014 г., Черногория, Будва), Лазерная физика и оптические технологии (2006 г., Беларусь, Гродно), 52-й и 55-й Международных конференциях МФТИ (2009 и 2012 г.); 10-й Баксанской Молодежной Школе Экспериментальной и Теоретической Физики (2010 г.), 2-й, 3-й и 4-й Всероссийской школе по лазерной физике и лазерным технологиям (2008 – 2010 гг., г. Саров), EMN Meeting on Organic Electronics and Photonics (2016), а также опубликованы в работах [1-6].

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации – 112 страниц, включая 23 рисунка и 11 страниц библиографии, содержащей 109 наименований.

### Содержание работы

**Во введении** обоснована задача исследования, сформулирована цель работы, приведены защищаемые положения, а также кратко изложено содержание работы.

**В первой главе** рассмотрены основные фотофизические процессы, представляющие интерес для исследования наведенного поглощения: радиационные, безызлучательные и интеркомбинационные. Особое внимание уделено спин – орбитальному взаимодействию, ответственному за интеркомбинационную конверсию. Дан обзор экспериментальных данных исследования эффекта тяжелого атома, являющегося следствием спин-орбитального взаимодействия. Рассмотрены структура и свойства соединений фталоцианинового ряда, наведенное поглощение которых подробно исследовано экспериментально. Подчеркнута особенность молекул этого ряда: разнообразие их модификаций, позволяющее регулировать свойства молекулы, меняя ее структуру. Приведены типичные спектры поглощения лазерного излучения фталоцианиновых молекул (как из основного состояния, так и триплет – триплет-

ного) и даны характерные значения сечений поглощения на длине волны 532 нм, как из основного состояния, так и возбужденных. Анализируется механизм и закономерности наведенного поглощения соединений фталоцианинового ряда. Рассмотрены работы, направленные на введение количественной меры наведенного поглощения. Показано, что характеристики, введенные в литературе, носят феноменологический характер, причем некоторые из них противоречат друг другу. Рассмотрены закономерности наведенного поглощения, обусловленные модификацией фталоцианиновых соединений. Показано, что введение тяжелого атома приводит к усилению наведенного поглощения. Завершается глава обсуждением моделей наведенного поглощения, представленных в литературе.

**Вторая глава** посвящена, описанию комплексу работ по изготовлению композита включая изготовление исходного нанопористого стекла, контролю качества образцов, а также исследованию ряда его свойств (нелинейной рефракции, лазерной прочности и др.).

**Методика изготовления образцов.** Основа композита – нанопористое стекло изготавливалась из стекла состава  $59,0\text{SiO}_2 \times 33,2\text{B}_2\text{O}_3 \times 3,8\text{K}_2\text{O} \times 4,0\text{Na}_2\text{O}$  ме-

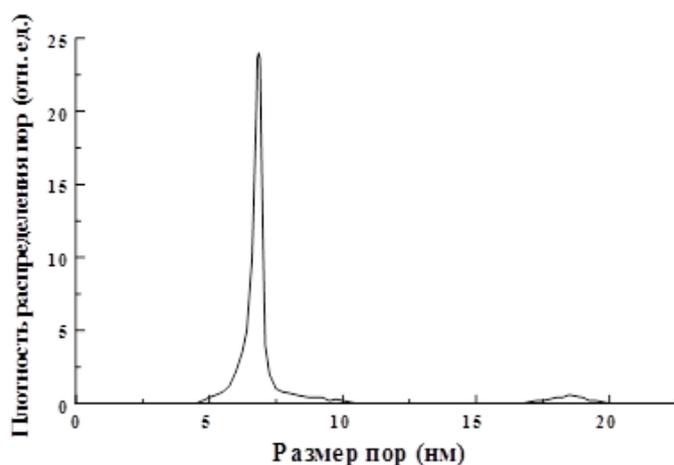


Рис.1. Распределение пор по размерам

тодом кислотного выщелачивания. Исследование распределения пор по размерам выполнилось методом водной порометрии. Установлено, что нанопористые стекла имеют пористость 40%, причем распределение пор по размерам узкое с резким максимумом в области 7 нм. Результаты исследования пор в одном из образцов показаны на Рис. 1. Полимерная основа композита – полиметилметакрилат. Его исходный мономер перегонялся, в нем растворялось органическое

тодом кислотного выщелачивания. Исследование распределения пор по размерам выполнилось методом водной порометрии. Установлено, что нанопористые стекла имеют пористость 40%, причем распределение пор по размерам узкое с резким

соединение. В приготовленный состав погружался образец нанопористого стекла, и затем проводилась свободно радикальная полимеризация

Были изготовлены оптические элементы из композита, активированные PсPb, PсZn и PrZn, а также прозрачные (не активированные) образцы. Одновременно, для проведения сравнительных испытаний изготавливались элементы из полиметилметакрилата, как прозрачные, так и активированные теми же соединениями. Микротвердость образцов композита составляла величину в диапазоне от 150 до 200 кгс/мм<sup>2</sup>, тогда как у полимерных находилась в пределах 20÷25 кгс/мм<sup>2</sup>. Они полировались до 4 класса чистоты; плоскопараллельность поверхностей оптических элементов была в пределах 30". Все образцы имели высокое оптическое качество. Размеры образцов из композита – 20×15×3 мм.

**Рассеяние излучения.** Композит нанопористое стекло–полимер – гетерогенная среда, причем разница показателя преломления кварцевого каркаса и полимера составляет значительную величину  $\Delta n \cong 2 \div 3 \times 10^{-2}$ , что предполагает сильное рассеяние излучения. В целях контроля светорассеяния элементов проводилось исследование оптической прозрачности, как полимерных, так и композитных образцов на установке, схема которой представлена на рисунке 2.

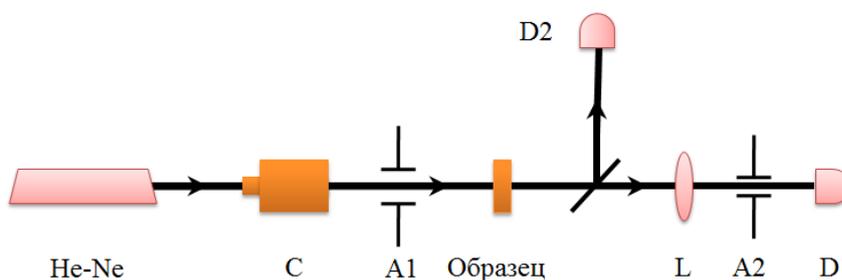


Рис. 2. Экспериментальная установка для оценки малоуглового рассеяния. He-Ne - лазер,  $\lambda = 633$  нм, C – коллиматор, A1 – диафрагма, L – собирающая линза, A2 ограничивающая апертурная диафрагма, D1 и D2 – фотодетекторы.

Выполненный контроль рассеяния излучения показал, что все изготовленные оптические элементы из композита характеризуются низким светорассеянием, сопоставимым с оптическим полимером. Этому результату дано истолко-

вание на основе теоремы Эвальда – Озеена, согласно которой подавление рассеяние является результатом интерференции излучения от отдельных включений при их высокой плотности.

**Локализация соединений в композите.** Органическое соединение, введенное в композит, может находиться как в его полимерной компоненте, так и адсорбироваться на поверхности стекла. Заметим, что нанопористое стекло, используемое нами для изготовления образцов, имеет удельную поверхность порядка  $500 \text{ м}^2/\text{см}^3$ , физико-химические свойства которой определяются большим количеством химически активных групп, локализованных на ее поверхности. Взаимодействие с ними может существенно изменить свойства органических молекул.

С целью выяснения области локализации органического соединения в композите (поверхность – полимерный компонент) были выполнены как исследования абсорбции, так и спектров поглощения соединения фталоцианинового ряда, использованных в работе.

При адсорбции органического соединения на поверхности стекла, оптическая плотность раствора, в который помещен образец, уменьшается с течением времени, тогда как его оптическая плотность должна возрастать. Контроль оптической плотности растворов PсPb, PсZn и PrZn, содержащих образец нанопористого стекла, показал, что она остается неизменной в течение нескольких суток. Следовательно, соединения PсPb, PсZn и PrZn не абсорбируются на поверхности стекла.

Исследование спектров поглощения выполнялись на спектрофотометре СМ 2203 фирмы Solarw в диапазоне длин волн от 400 до 800 нм. Установлено, что спектры поглощения всех исследованных соединений в растворе мономера совпадают в пределах точности измерений со спектрами этих соединений, как в полимере, так и композите при всех исследованных концентрациях. Неизменность спектров поглощения в растворах с изменением концентрации, показывает, что ассоциаты соединений, как в растворе, так и твердой матрицы не образуются.

**Исследование методом Z – сканирования.** Предварительное исследование наведенного поглощения соединений PсPb, PсZn и PrZn, введенных в композит и полимер, выполнялось методом Z-сканирования. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.

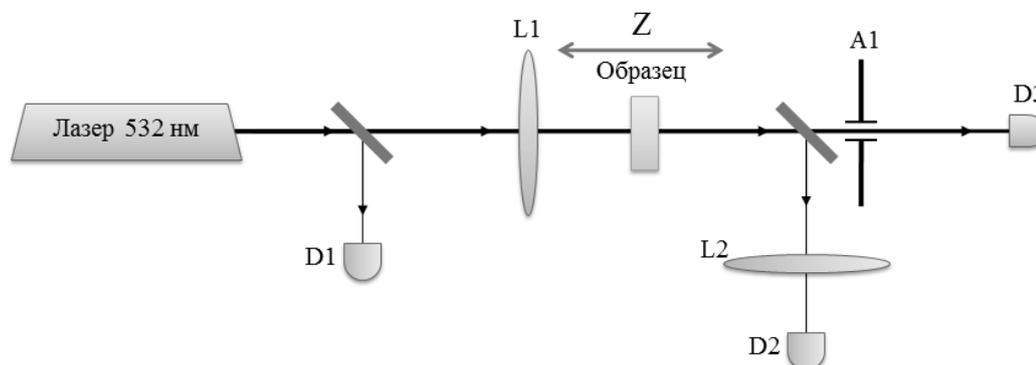


Рис. 3 Схема установки для исследования нелинейной рефракции методом Z-сканирования. A1 – диафрагма  $\varnothing$  3,5 мм, L1 – линза с фокусным расстоянием 135 мм, D1, D2 и D3 – фотоприемники

Установлено, что композитный оптический элемент, активированный соединениями фталоцианинового ряда, демонстрирует хороший контраст наведенного поглощения. Наилучший результат получен у соединения PсPb. Его контраст  $C = T_0/T_{sat}$  (где  $T_0$  – пропускание в линейном режиме  $T_{sat}$  – пропускание при насыщении поглощения) равнялся 10. Кроме того, установлено, что соединения фталоцианинового ряда, введенные в композит, устойчивы к действию излучения в области интенсивностей, включающей область насыщения поглощения.

При исследовании контраста полимерных образцов, активированных соединениями PсPb, PсZn и PrZn, было выявлено наличие у полимера нелинейной рефракции. С целью оценки ее величины были выполнены дополнительные эксперименты методом Z-сканирования с узкой апертурой. Исследовались прозрачные (не активированные органическими соединениями) образцы, как композита, так и его полимерной компоненты. Установлено, что коэффициент нелинейной рефракции полимерной компоненты ком-

позита, составляющий величину  $n_2 = -1 \times 10^{-11} \text{ см}^2/\text{Вт}$ . Показано, что у композита нелинейная рефракция отсутствует, несмотря на ее наличие у его полимерной компоненты. Это различие объясняется разной структурой «свободного» полимера и полимера, сформированного в нанопористом стекле.

**Лазерная прочность композита.** Исследование лазерной прочности композита проводилась в условиях, при которых изучалась наведенное поглощение функциональных органических соединений: при длительности импульса 26 нс и длине волны 532 нм в двух режимах  $1 \times 1$  и  $1 \times 200$  (одна область облучается одним импульсом и 200 импульсами соответственно). Схема экспериментальной установки показана на Рис. 4.

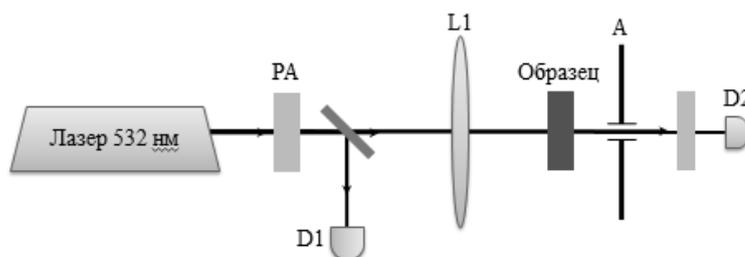


Рис. 4. Схема установки для исследования разрушения. А – диафрагма диаметром 2 мм, L1 – линза с фокусным расстоянием 60 мм, D1 и D2 – фотоприемники. РА - аттенюатор

Предварительные исследования показали, что разрушение (трещина, регистрируемая визуально в микроскоп) всегда сопровождается искрой, приводящей к отсечке излучения, то есть резким падением сигнала фотоприемника D2. При последующих исследованиях визуальный контроль формирования трещины не проводился, а факт лазерного разрушения фиксировался по падению сигнала на фотоприемнике D2.

Установлено, что в режиме облучения  $1 \times 1$  наблюдается пространственные флуктуации лазерной прочности, характерные для разрушения инициированного поглощающими включениями. Проведена статистическая обработка результатов эксперимента методом окон. Критерием выбора раз-

мера окна было требование монотонного роста вероятности разрушения с увеличением интенсивности. В результате обработки получено, что порог разрушения по уровню вероятности 0,5, равен  $35 \text{ Дж/см}^2$ , что составляет с учетом длительности лазерного импульса  $0,76 \text{ ГВт/см}^2$ .

В режиме облучения  $1 \times 200$  пороговая плотность энергии лазерного излучения составляла  $17,5 \text{ Дж/см}^2$ , что соответствует интенсивности  $0,38 \text{ ГВт/см}^2$ . Последняя величина на порядок превышает интенсивности насыщения поглощения соединений фталоцианинового ряда.

Поскольку пороговые интенсивности разрушения на порядок превосходят область интенсивности, в которой наблюдается насыщение наведенного поглощения у соединений фталоцианинового ряда, то, следовательно, композитная матрица пригодна для изготовления твердотельных элементов, активированных соединениями фталоцианинового ряда.

**Третья глава** посвящена исследованию пятиуровневой модели с целью введения физически обоснованных определяющих параметров наведенного поглощения, а также их экспериментальному обоснованию и определению этих параметров для фталоцианиновых соединений, введенных в композитную матрицу.

**Двухпараметрическая зависимость.** Энергетическая диаграмма пятиуровневой модели, показана на Рис. 5. Коэффициент поглощения в рамках этой модели имеет вид  $\alpha(I) = \sigma_{S_0} n_{S_0} + \sigma_S n_S + \sigma_T n_{T_1}$  (где  $n_{S_0}, n_{S_1}$  и  $n_{T_0}$  – населенности уровней  $S_0, S_1$  и  $T_1$ , соответственно). Изменение интенсивности излучения, проходящего через оптически тонкий образец, описывается уравнением

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha(I)I(z) \quad (1)$$

где  $z$  – координата в направлении распространения излучения. Решение уравнения (1) должно удовлетворять начальному условию  $I(z)|_{z=0} = I_0$ .

Населенности уровней  $n_{S_0}$ ,  $n_{S_1}$  и  $n_{T_0}$  находятся из решения скоростных

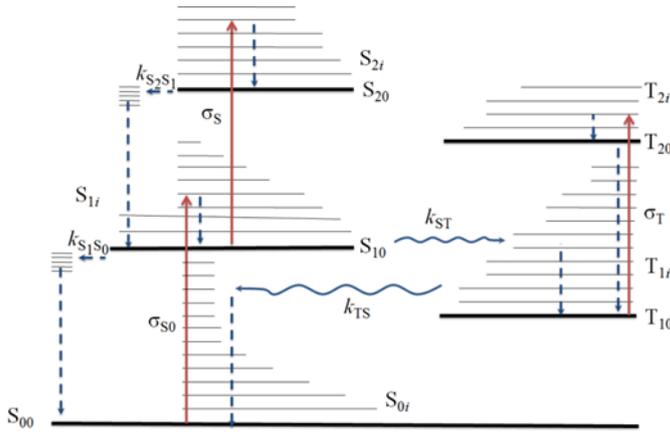


Рис. 5. Пятиуровневая модель многоатомной молекулы.

уравнений (2)–(6). Они монотонно возрастают при действии лазерного излучения. Численные значения определяющих параметров характеризуются наибольшим изменением поглощения молекулы при действии излучения, что реализуется при максимальной заселенности ее первых возбужденных

уровней при заданном уровне интенсивности излучения и, следовательно, находятся из стационарного решения скоростных уравнений.

$$\dot{n}_{S_0} = -(I/\hbar\omega)\sigma_{S_0}n_{S_0} + k_{S_0}n_{S_1} + k_{TS}n_{T_1} \quad (2)$$

$$\dot{n}_{S_2} = (I/\hbar\omega)\sigma_S n_{S_1} - k_S n_{S_2} \quad (3)$$

$$\dot{n}_{T_1} = -(I/\hbar\omega)\sigma_T n_{T_1} - k_{TS}n_{T_1} + k_T n_{T_2} + k_{ST}n_{S_1} \quad (4)$$

$$\dot{n}_{T_2} = (I/\hbar\omega)\sigma_T n_{T_1} - k_T n_{T_2} \quad (5)$$

$$n_{S_0} + n_{S_1} + n_{S_2} + n_{T_1} + n_{T_2} = N \quad (6)$$

Вычисляя населенности уровней  $n_{S_0}$ ,  $n_{S_1}$  и  $n_{T_0}$  из системы (2) – (6) находим  $\alpha(I)$  и, подставляя его в уравнения (1), после интегрирования получим двухпараметрический закон, описывающий пропускание образца в условиях наведенного поглощения

$$T \left( \frac{1+T I/I_{cr}}{1+I/I_{cr}} \right)^{R^{-1}-1} = T_0 \quad (7)$$

где  $T = T(I)$  и  $T_0 = \exp(-\sigma_{S_0}Nd)$  – пропускание образца при интенсивности  $I$  и при малой интенсивности излучения соответственно,  $d$  – толщина образца. Кроме того, зависимость (7) содержит два определяющих параметра наведенного поглощения: критическую интенсивность

$$I_{cr} = \frac{\hbar \omega k_{S1}}{\sigma_S + \eta \sigma_T} \quad (8)$$

где  $\eta = k_{ST}/k_{TS}$ , и параметр контраста

$$R = \frac{\sigma_{ST}}{\sigma_{S0}} \quad (9)$$

где  $\sigma_{ST} = (k_{TS}\sigma_S + k_{ST}\sigma_T)/(k_{TS} + k_{ST})$  – приведенное сечение поглощения молекулы органического соединения из возбужденных состояний.

Параметр контраста равный отношению приведенного сечения поглощения из возбужденных состояний к сечению поглощения из основного состояния, достаточно просто определяется по экспериментальным данным. Из равенства (8) следует, что его величина определяется соотношением

$$R = \ln T_{sat}/\ln T_0 \quad (10)$$

где  $T_{sat}$  – пропускание образца при насыщении поглощения.

Критическая интенсивность равна интенсивности, при которой число переходов  $S_{00} \rightarrow S_{1v}$  в единицу времени равно сумме переходов в единицу времени  $S_{10} \rightarrow S_{2v}$  и  $T_{10} \rightarrow T_{2v}$ :

$$\sigma_{S0} n_{S0} I_{cr} = \sigma_S n_{S1} I_{cr} + \sigma_T n_{T1} I_{cr} \quad (11)$$

Наведенное поглощения обусловлено переходами как в синглетном так и в триплетном канале. Для типичного соединения фталоцианинового ряда при действии импульсов пикосекундной длительности доминирует поглощение в синглетном канале, тогда как в области наносекундной длительности – в триплетном канале. Из (7) следует, что отношение критических интенсивностей синглетного и триплетного каналов есть

$$\frac{I_{cr}^S}{I_{cr}^T} = \frac{k_{ST}\sigma_T}{k_{TS}\sigma_S} \quad (12)$$

Поскольку, в типичном случае  $\sigma_S$  и  $\sigma_T$  одного порядка, то, стало быть,  $I_{cr}^S/I_{cr}^T \sim k_{ST}/k_{TS}$ . Как известно ( $\dots$ )  $k_{ST}/k_{TS} \sim 100$ , то есть  $I_{cr}^S/I_{cr}^T \sim 100$ . Таким образом, критическая интенсивность триплетного канала поглощения на два порядка меньше, чем синглетного.

**Экспериментальное обоснование.** Схема экспериментальной установки, использованной для исследования зависимости пропускания образцов активированных органическими соединениями от  $W$  – плотности энергии лазерного импульса показана на Рис. 6.

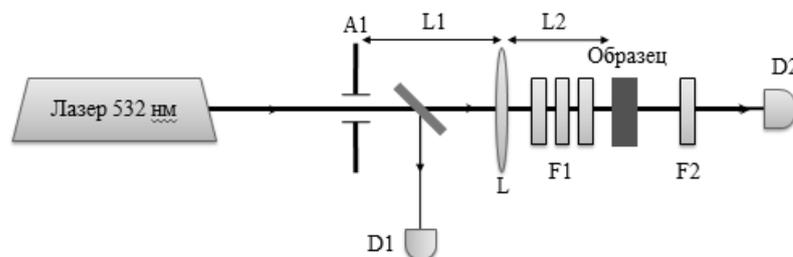


Рис. 6. Схема установки для исследования пропускания оптического элемента. A1 – диафрагма  $\varnothing 2$  мм, F1 и F2 –нейтральные светофильтры, L – линза с фокусным расстоянием 8 см, D1 и D2 – фотоприемники.

Исследование выполнялось для оптических элементов из композита нанопористое стекло – полимер, активированных соединениями PcPb, PcZn и

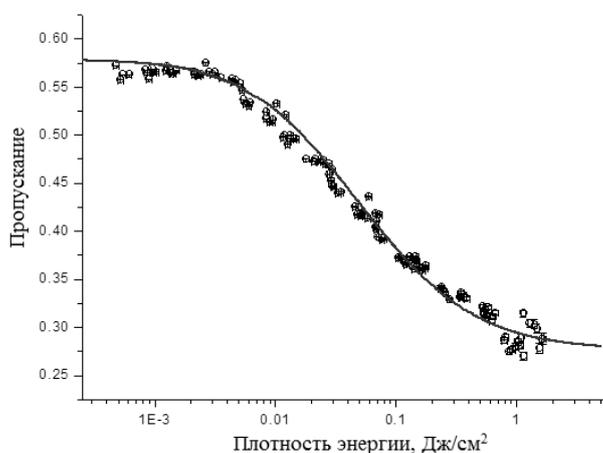


Рис. 7. Зависимость пропускания от плотности энергии лазерного излучения образца композита активированного PcZn.

PrZn. Длительность импульса составляла  $24 \pm 1$  нс. Полученные результаты показывают полное соответствие с теоретической зависимостью рассчитанной исходя из двухпараметрической зависимости (7). Пример сопоставления экспериментальных данных с пропусканием, рассчитанным

согласно соотношению (7) для PcZn показан на Рис.7.

Данные приведенные в литературе также адекватно описываются зависимостью (7). Пример обработки результатов эксперимента работы MansourK. etal. OE/LASE'93: Optics, Electro-Optics, Laser Applications in Sci-

*ence&Engineering. – International Society for Optics and Photonics, 1993. – С. 132-141.* для раствора PcSi в толуоле для двух длительностей импульсов 8 нс и 70 пс представлены на Рис. 8. В соответствии с данными этой работы при действии импульсов пикосекундной длительности доминирует поглощение в синглетном канале, тогда как в области наносекундной длительности – в триплетном канале. Соотношение пороговых интенсивностей синглетного и триплетного каналов для соединений PcSi и PcSn, рассчитанные в соответствии с двухпараметрической зависимостью (7), составляют величины  $I_{cr}^S \cong 68I_{cr}^T$  для PcSi и  $I_{cr}^S \cong 227I_{cr}^T$  для PcSn. Этот результат находится в согласии с оценкой (12).

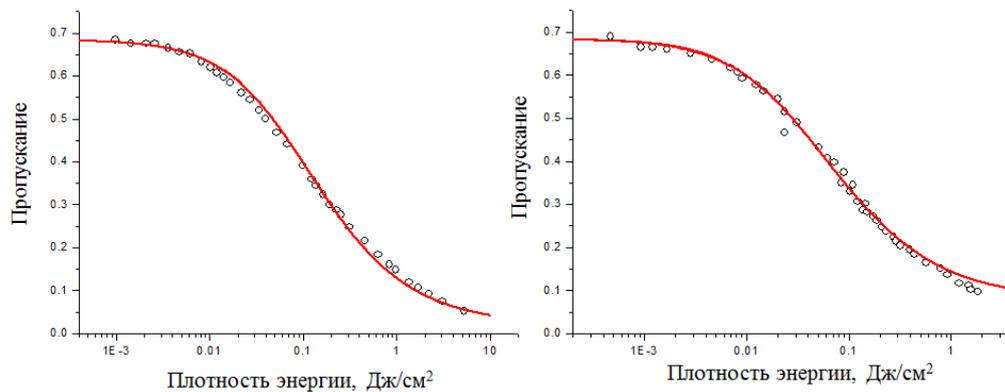


Рис. 8. PcSi в толуоле: слева длительность импульса 8 нс, справа 70 пс. Сплошная линия, результат численного расчета.

Численные значения определяющих параметров для ряда органических соединений приведены в таблице

Соединение	Раствор	$R$	$W_{cr}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$I_{cr}$ , МВт/см <sup>2</sup>	$\tau_p$
PcPb	НПСП	3,7	0,013	0,5	24 нс
PcZn	НПСП	2,4	0,02	0,8	24 нс
PrZn	НПСП	1,7	0,005	0,2	24 нс
PrZn	этилацетат	1,8	0,014	0,6	24 нс
PcSi	толуол	8,3	0,029	3,6	8 нс
PcSn	толуол	10	0,014	1,7	8 нс

PcSi	толуол	6,6	0,017	246	70 пс
PcSn	толуол	6,2	0,027	386	70 пс

Таким образом, выполненные исследования позволяют сделать вывод, что двухпараметрическая зависимость (7) адекватно описывается наведенное поглощение органических соединений, причем для его полного описания достаточно определить два определяющих параметра: критическую интенсивность и параметр контраста.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе.

1. Получена теоретически и обоснована экспериментально двухпараметрическая зависимость, описывающая наведенное поглощение органических соединений в различных средах. Показано, что параметры этой зависимости (контраст и критическая интенсивность) адекватно характеризуют наведенное поглощение органических соединений. Критическая интенсивность наведенного поглощения ранее не рассматривалась. Экспериментально определен контраст и критическая интенсивность наведенного поглощения для ряда фталоцианиновых соединений.
2. Показано, что полимерная компонента композита характеризуется значительной нелинейной рефракцией, тогда как у композита нанопористое стекло – полимер нелинейная рефракция отсутствует. Такое поведение определяется различием структуры объемного полимера и полимера, сформированного в нанопорах стекла. Измерен коэффициент нелинейной рефракции полимерной компоненты композита.
3. Показано, что композитная матрица перспективна для разработки нелинейных оптических элементов, активированных соединениями фталоцианинового ряда. Лазерная прочность композита как в режиме однократного, так и многократного воздействия значительно превосходит интенсивность, при которой наблюдается насыщение поглощения соединений фталоцианинового ряда, введенных в композит, а также порога их деформации.

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. Долотов С. М. и др. Нелинейное поглощение лазерного излучения фталоцианинами цинка и свинца и порфирином цинка, находящимися в композитной матрице нанопористое стекло-полимер //Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – №. 1. – С. 39-43.
2. Колдунов М. Ф., Колдунов Л. М. Определяющие параметры наведенного поглощения функциональных органических соединений// Труды МФТИ. – 2014. – Том 6. – № 3. – С. 92-101.
3. Koldunov M. F., Koldunov L. M. Two-parametric scaling law and figures of merit of excited-state absorption of organic dyes //Optics Communications. – 2017. – Т. 385. – С. 199-204.
4. Koldunov L. M. et al. Nonlinearrefractionandnonlinearabsorptioninnanoporousglasscompositeactivatedbyfunctionaldyes //ICONO 2010. – International Society for Optics and Photonics, 2010. – С. 79930M-79930M-7.
5. Koldunov L. M. et al. Reversible nonlinear absorption in nanoporous glass-polymer composite doped with functional dyes: experiment and background model //ICONO 2010. – International Society for Optics and Photonics, 2010. – С. 79930K-79930K-7
6. Колдунов М. Ф., Колдунов Л. М. Показатели качества наведенного поглощения оптического излучения в органических соединениях //Прикладная физика. – 2015. – №. 5. – С. 5.