

УДК 535.015

Показатели качества наведенного поглощения оптического излучения в органических соединениях

М. Ф. Колдунов, Л. М. Колдунов

На основе скоростных уравнений выполнен анализ наведенного поглощения органических соединений. Показано, что наведенное поглощение характеризуется двумя показателями качества: контрастом и критической интенсивностью. Сопоставление результатов расчета с данными экспериментов показывает, что развитые представления адекватно описывают наведенное поглощение органических соединений. Для соединений фталоцианинового ряда (PcPb, PcZn, PcSn, PcSi) и порфирина цинка (PrZn) рассчитаны показатели качества.

PACS 42.70.hj; 42.65.-k; 42.70.-a.

Ключевые слова: наведенное поглощение, органические соединения, фталоцианины, определяющие параметры.

Введение

Исследованию наведенного поглощения посвящено большое количество работ [1—9]. Интерес к нему обусловлен практическими потребностями в создании нелинейных оптических элементов для лазерной техники. В частности, большое количество работ посвящено исследованию наведенного поглощения органических соединений, которые в области пико- и наносекундной длительностей импульсов лазерного излучения видимого и ближнего ИК-диапазонов являются, по-видимому, наиболее перспективными для разработки пассивного ограничителя мощности [1]. Особенно активно исследования проводятся с соединениями фталоцианинового ряда [2—8], обладающими высокой устойчивостью к мощному лазерному излучению, высокой скоростью затемнения при действии излучения и быстрой релаксацией в исходное состояние при его прекращении.

Привлекательной стороной органических соединений является возможность их модификации. Так, у соединений фталоцианинового ряда можно заменить центральный катион, аксиальный лиганд и периферийный заместитель [2—6]. Модификация соединений ведет к изменению их наведенного поглощения, что позволяет оптимизировать структуру соединения методами молекулярной инженерии с целью получения требуемых свойств. Для решения этой задачи необходимо четкое понимание связи характеристик наведенного поглощения со структурой и составом молекулы. Выявление корреляции «состав — свойства молекул» невозможно без определения физически обоснованных количественных характеристик наведенного поглощения.

Попытки введения количественных характеристик наведенного поглощения были предприняты в ряде работ, итоги которых суммированы в обзоре [5], где собраны различные определяющие параметры (показатели качества) наведенного поглощения, предложенные ранее, в частности, в [5] показано, что на проблему введения показателей качества наведенного поглощения в литературе нет единого взгляда. Разные авторы используют различные характеристики наведенного поглощения, что затрудняет, а зачастую делает невозможным сопоставление результатов, полученных в разных работах.

Наибольшим недостатком введенных характеристик наведенного поглощения является их феноменологический характер. Показатели качества вводятся из общих соображений, без какого либо обоснования и часто связаны с использованной авторами экспериментальной методикой исследова-

Колдунов Модест Федорович, ведущий научный сотрудник¹, профессор^{2,3}.

Колдунов Леонид Модестович, ассистент¹, научный сотрудник².

¹Институт общей физики РАН им. А. М. Прохорова.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

E-mail: modest@gan.gpi.ru

²Московский физико-технический институт (ГУ).

Россия, 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

E-mail: lenia-laboratory@yandex.ru

³ВА РВСН им. Петра Великого.

Россия, 109074, Москва, Китайгородский пр-д, 9.

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2015 г.

© Колдунов М. Ф., Колдунов Л. М., 2015

дования наведенного поглощения. Параметры, введенные без надлежащего обоснования, не могут адекватно характеризовать наведенное поглощение и зачастую противоречат друг другу. Так, например, в работе [3] без какого либо обоснования введен параметр $\bar{R} = \sigma_{es}/\sigma_g$ (где σ_{es} и σ_g — сечение поглощения из возбужденного и основного состояния соответственно), тогда как в работе [2] полагалась, что за характеристику наведенного поглощения следует принять величину разности сечения поглощения: $(\sigma_{es} - \sigma_g)$. Более того, авторы [2] на основе экспериментальных данных для соединений XPrIn (где X — аксиальный лиганд Cl, Br или I) утверждали, что контраст \bar{R} неадекватно характеризует соединения этого ряда.

Цель данной работы — последовательный анализ наведенного поглощения, введение на его основе физически обоснованных показателей качества наведенного поглощения органических соединений и методов их корректного определения, а также анализ результатов экспериментов, представленных в литературе.

Основные уравнения и определяющие параметры наведенного поглощения

Механизм наведенного поглощения обусловлен каскадными переходами, для его описа-

ния применяется феноменологическая пятиуровневая модель [2, 6], схема уровней которой приведена на рис. 1. Эта модель положена в основу последующего рассмотрения. Она предполагает, что наведенное поглощение адекватно описывается скоростными уравнениями, при этом колебательная релаксация протекает мгновенно, а люминесценция не учитывается. В работе [6] и ряде других показано, что результаты численного расчета скоростных уравнений этой модели не противоречат экспериментальным данным исследования наведенного поглощения органических соединений.

При экспериментальном исследовании наведенного поглощения изучают пропускание $T(I)$ оптически тонкого образца, которое находится из уравнения распространения излучения через вещество, имеющее в этом случае вид:

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

где z — координата в направлении распространения излучения, I — интенсивность излучения, а $\alpha(I)$ — коэффициент поглощения. Решение уравнения (1) должно удовлетворять условию $I(z)|_{z=0} = I(0)$, где $I(0)$ — интенсивность излучения на входе в образец.

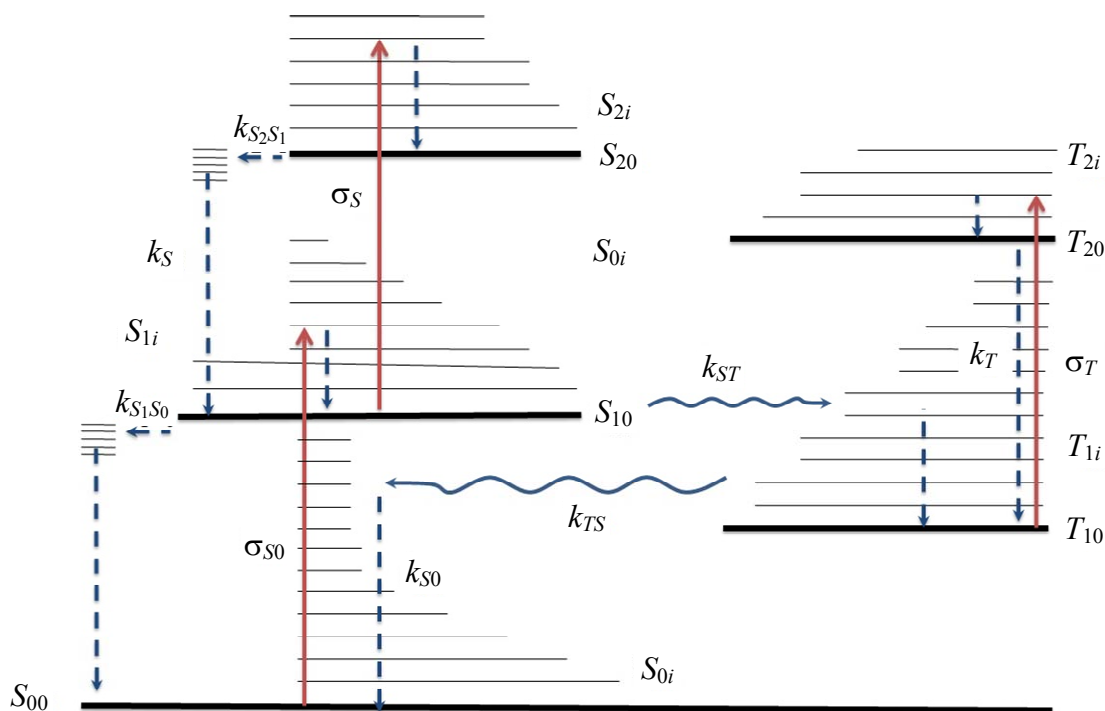


Рис. 1. Схема энергетических состояний пятиуровневой модели многоатомной молекулы. σ_{S0} , σ_S , σ_T — сечения поглощения; k_{S0} , k_S , k_T — скорости безызлучательной релаксации; k_{ST} , k_{TS} — скорости интеркомбинационных переходов

В рамках пятиуровневой модели, коэффициент поглощения молекулы равен:

$$\alpha(I) = \sigma_{S_0} n_{S_0} + \sigma_S n_{S_1} + \sigma_T n_{T_1}, \quad (2)$$

где n_{S_0} , n_{S_1} и n_{T_1} — населенности уровней S_0 , S_1 и T_1 соответственно, а σ_{S_0} , σ_S и σ_T сечения поглощения переходов $S_0 \rightarrow S_1$, $S_1 \rightarrow S_2$ и $T_1 \rightarrow T_2$. Согласно равенству (2), для определения коэффициента поглощения необходимо рассчитать населенности уровней S_0 , S_1 и T_1 , которые находятся из скоростных уравнений

$$\dot{n}_{S_0} = -(I/\hbar\omega)\sigma_{S_0}n_{S_0} + k_{S_0}n_{S_1} + k_{TS}n_{T_1} \quad (3)$$

$$\dot{n}_{S_2} = (I/\hbar\omega)\sigma_S n_{S_1} - k_S n_{S_2} \quad (4)$$

$$\dot{n}_{T_1} = -(I/\hbar\omega)\sigma_T n_{T_1} - k_{TS}n_{T_1} + k_T n_{T_2} + k_{ST}n_{S_1} \quad (5)$$

$$\dot{n}_{T_2} = (I/\hbar\omega)\sigma_T n_{T_1} - k_T n_{T_2} \quad (6)$$

$$n_{S_0} + n_{S_1} + n_{S_2} + n_{T_1} + n_{T_2} = N, \quad (7)$$

где n_{S_2} и n_{T_2} — населенности уровней S_2 и T_2 соответственно, k_{S_0} , k_S и k_T — скорости внутренней конверсии состояний S_1 , S_2 и T_2 , k_{ST} , k_{TS} — скорости интенкомбинационной конверсии состояний S_1 , T_1 , N — концентрация молекул органического соединения, ω — частота лазерного излучения. Решение уравнений (1)–(7) позволяет определить как зависимость пропускания образца от интенсивности излучения $T(I)$, так и определяющие параметры наведенного поглощения. Значениям показателей качества соответствует наибольшее изменение поглощения молекулы при действии излучения, что реализуется при наибольшем изменении населенностей уровней молекулы, которое достигается в стационарных условиях. Стационарное решение уравнений (3)–(7) дает населенности уровней молекулы. В частности, для уровней S_0 , S_1 и T_1 запишем следующие соотношения:

$$n_{S_0} = N / \left\{ 1 + [1 + (k_{ST}/k_{TS})] I/I_{S_0} + I^2/I_{S_0} I_{ST} \right\} \quad (8)$$

$$n_{T_1} = (k_{ST}/k_{TS}) n_{S_1}, \quad n_{S_1} = (I/I_{S_0}) n_{S_0} \quad (9)$$

где $I_{S_0} = \hbar\omega(k_{S_0} + k_{ST})/\sigma_{S_0}$, I_{ST} — приведенная интенсивность «насыщения» возбужденных состояний S_{10} и T_{10} , определенная равенством $1/I_{ST} = 1/I_S + (k_{ST}/k_{TS}) \times 1/I_T$, $I_S = \hbar\omega k_S/\sigma_S$ и $I_T = \hbar\omega k_T/\sigma_T$.

Скоростные уравнения пятиуровневой модели адекватно описывают наведенное поглощение в области интенсивностей, когда населенности уровней S_2 и T_2 пренебрежимо малы. В противном случае необходимо учитывать более высоко лежащие энергетические уровни. Согласно (8) и (9), это требование выполняется в области интенсивностей:

$$I^2 \ll I_{S_0} I_{ST}. \quad (10)$$

Тогда $n_{S_0} \cong N / \left\{ 1 + [1 + (k_{ST}/k_{TS})] I/I_{S_0} \right\}$ и коэффициент поглощения принимает вид:

$$\alpha(I) \cong \sigma_{S_0} N \frac{1 + I/I_{cr}}{1 + [1 + (k_{ST}/k_{TS})] I/I_{S_0}} \quad (11)$$

где I_{cr} — критическая интенсивность, определенная равенством:

$$I_{cr} = \frac{\hbar\omega(k_{S_0} + k_{ST})}{\sigma_S + (k_{ST}/k_{TS})\sigma_T}. \quad (12)$$

Интегрируя уравнение (1), получаем двухпараметрический закон наведенного поглощения, позволяющий рассчитать зависимость пропускания от интенсивности:

$$T \left(\frac{1 + T I/I_{cr}}{1 + I/I_{cr}} \right)^{R-1-1} = T_0 \quad (13)$$

где $T = I(d)/I(0)$, $T_0 = \exp(-\sigma_{S_0} N d)$ — пропускание образца в линейном режиме, d — толщина образца, R — параметр контраста, определенный равенством:

$$R = \frac{\sigma_{ST}}{\sigma_{S_0}}, \quad (14)$$

где $\sigma_{ST} = [k_{TS}/(k_{TS} + k_{ST})]\sigma_S + [k_{ST}/(k_{TS} + k_{ST})]\sigma_T$ — приведенное сечение поглощения молекулы органического соединения из возбужденных состояний. Согласно (13), зависимость пропускания от интенсивности излучения однозначно определяется тремя параметрами, а именно: T_0 , R и I_{cr} . Пропускание T_0 не имеет отношение к поглощению из возбужденных состояний, поэтому наведенное поглощение характеризуется лишь двумя показателями качества: контрастом R и критической интенсивностью I_{cr} .

Контраст равен отношению приведенного сечения поглощения из возбужденных состояний к

сечению поглощения из основного состояния. Он связан с величинами, измеримыми экспериментально. Из равенства (13) следует, что в области малых интенсивностей $T_0 = \exp(-\sigma_{S_0}Nd)$, тогда как в пределе больших интенсивностей (в области насыщения поглощения) $T_{sat} = \exp(-\sigma_{S_T}Nd)$, так что $R = \ln T_{sat} / \ln T_0$.

Выражение для критической интенсивности (12) принципиально отличается от интенсивности «насыщения» двухуровневой системы, несмотря на внешнее сходство. Интенсивность «насыщения» пропорциональна скорости релаксации населенности уровня и обратно пропорционально сечению поглощения, обеспечивающего его заселение при действии излучения. Критическая интенсивность также пропорциональна скорости релаксации населенности уровня, но обратно пропорциональна эффективному сечению ухода населенности с уровня на более высоко лежащие уровни. Ее физический смысл следует из равенства

$$\sigma_{S_0}n_{S_0}(I_{cr})I_{cr} = \sigma_{S_1}n_{S_1}(I_{cr})I_{cr} + \sigma_{T_1}n_{T_1}(I_{cr})I_{cr}. \quad (15)$$

Согласно (15), она равна интенсивности лазерного излучения, при которой в стационарном режиме действия излучения скорость переходов $S_0 \rightarrow S_1$ равна сумме скоростей переходов $S_1 \rightarrow S_2$ и $T_1 \rightarrow T_2$. Из (15) следует, что в области $I \leq I_{cr}$ поглощение обусловлено, главным образом, переходом $S_0 \rightarrow S_1$, тогда как в области $I \geq I_{cr}$ доминирует наведенное поглощение, связанное с переходами $S_1 \rightarrow S_2$ и $T_1 \rightarrow T_2$.

Определение показателей качества по экспериментальным данным

При проведении эксперимента, как правило, исследуется зависимость пропускания образца от плотности энергии лазерного импульса W . В случае импульса с гладкой пространственной и временной формой (при стационарном распределении населенностей по уровням молекулы) справедливо равенство $I/I_{cr} \cong W/W_{cr}$, и, следовательно, $T(I/I_{cr}) \cong T(W/W_{cr})$.

Зависимость пропускания от плотности энергии во всей области ее изменения определяется тремя параметрами: величиной пропускания T_0 и двумя показателями качества наведенного поглощения R и W_{cr} . Для корректного определения контраста необходимо измерить пропускание как

в линейном режиме, так и области насыщения поглощения органического соединения. Отношение логарифмов этих величин определяет контраст $R = \ln T_{sat} / \ln T_0$. Еще одно измерение пропускания, а именно, при каком-либо промежуточном значении плотности энергии позволяет рассчитать W_{cr} . К сожалению, во многих работах [4, 5, 7], отсутствуют данные по исследованию наведенного поглощения в области насыщения, а потому невозможно корректно определить показатель контраста.

Необходимые данные для корректного определения показателей качества соединений фталоцианинового ряда представлены в работах [6, 8]. В [8] приведены результаты исследования наведенного поглощения оптических элементов из композита «нанопористое стекло — полимер» (далее, композит), активированные PcPb, PcZn и PrZn, а также раствора PrZn в этилацетате. Длительность импульса при исследовании оптических элементов составляла 24 ± 1 нс. Характерное время интеркомбинационной конверсии $S_1 \rightarrow T_1$ этих соединений по порядку величины не превышает 1 нс [9], что гарантирует установление стационарного распределения электронов по уровням молекулы при действии лазерного импульса. Обработка данных, представленных в этой работе, показала, что они для всех соединений хорошо описываются двухпараметрическим законом наведенного поглощения (13). Это иллюстрируется на рис. 2, где дано сопоставление данных работы [8] для PcZn в композитной матрице и результатов численного расчета пропускания от плотности энергии лазерного излучения, согласно закону (13). Показатели качества соединений, рассчитанные по данным работы [8] для PcPb, PcZn и PrZn представлены в таблице. В работе [6] приведены результаты исследования наведенного поглощения растворов PcPb, PcZn, PcSn, PcSi в толуоле. Исследования проводилась при длительностях импульсов 8 нс и 70 пс. Требования стационарного приближения выполнены для импульсов длительностью 8 нс. Подробные экспериментальные данные, пригодные для обработки данных представлены в работе [6] для PcSn, PcSi. Данные для этих соединений, также как и данные работы [8], хорошо описываются соотношением (13). Сопоставление экспериментальных данных работы [6] для PcSi с результатами расчета пропускания согласно закону (13) показано на рис. 2. Показатели качества PcSn, PcSi представлены в таблице.

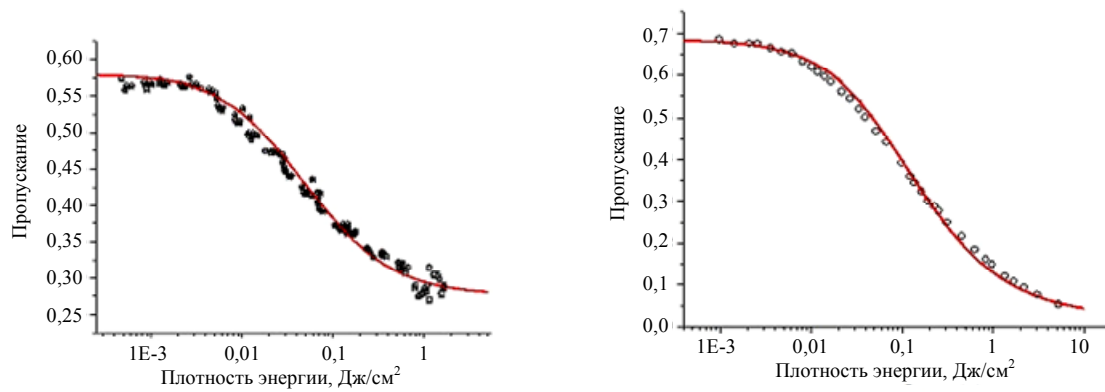


Рис. 2. Зависимость пропускания от плотности энергии лазерного излучения. Логарифмический масштаб по шкале плотности энергии. Слева — *PcZn* в композите нанопористое стекло — полимер, справа — *PcSi* в толуоле

Таблица

Соединение	Среда	<i>R</i>	<i>W_{cr}</i> , Дж/см ²	<i>I_{cr}</i> [*] , МВт/см ²
PcPb	Композит	3,7	0,013	0,5
PcZn	Композит	2,4	0,02	0,8
PrZn	Композит	1,7	0,005	0,2
PrZn	Этилацетат	1,8	0,014	0,6
PcSi	Толуол	8,3	0,029	3,6
PcSn	Толуол	10	0,014	1,7

* Величина критической интенсивности вычислена из равенства $I_{cr} = W_{cr}/\tau_p$, справедливое для импульса прямоугольной формы, где τ_p — длительность импульса лазерного излучения.

Обсуждение

Во всех ранее выполненных работах при введении количественных характеристик наведенного поглощения полагалось, что соединение характеризуется единственным определяющим параметром. Как следует из приведенного выше анализа, таких параметров два: контраст и критическая интенсивность. Эти параметры полностью характеризуют наведенное поглощение органического соединения. Они позволяют корректно сопоставить эффективность наведенного поглощения, выбрать оптимальное соединение для практического применения и создают надежную основу для выявления корреляции структуры и состава молекулы с эффективностью наведенного поглощения. Они позволяют сделать и другие выводы, представляющие физический интерес. Например, на основе этих величин можно выявить влияние среды на наведенное поглощение. Действительно, согласно данным, приведенным в таблице, величина контраста $R = \sigma_{ST}/\sigma_{S0}$ одинакова (в пределах точности эксперимента [8]) для PrZn в композите и этилацетате. Согласно данным работы [8], спектры поглощения PrZn в композите и этилацетате совпадают в пределах точности эксперимента, и, следовательно, сечения σ_{S0} у PrZn в

композите и этилацетате одинаковы, так что одинаковы и сечения поглощения переходов $S_1 \rightarrow S_2$ и $T_1 \rightarrow T_2$. В то же время величина критической интенсивности наведенного поглощения PrZn I_{cr} в композите в три раза меньше, чем в растворе этилацетата. Это изменение критической интенсивности наведенного поглощения PrZn, с учетом выражения (12) и равенства сечений поглощения, связано с большей скоростью релаксации уровня S_1 в жидкой среде сравнительно с композитом. Такая тенденция изменения скорости безызлучательной релаксации органической молекулы при изменении среды хорошо известна [10].

В ряде работ [11–13] исследование наведенного поглощения выполнялось методом Z-сканирования [14]. В связи с этим представляет интерес сопоставить характеристики, введенные в данной работе, с результатами, полученными методом Z-сканирования. В рамках метода Z-сканирования коэффициент поглощения аппроксимируют выражением $\alpha(I) = \alpha + \beta I$, а в качестве характеристики наведенного поглощения часто принимается коэффициент нелинейного поглощения β . Кроме него, на основе метода Z-сканирования в качестве параметра, по которому сравнивают органические соединения, можно встретить «пороговую» интенсивность $I_{th} = \alpha/\beta$ [11].

При выполнении требования стационарного приближения коэффициент поглощения пятиуровневой модели дается выражением (11). Разлагая его в ряд Тейлора и удерживая слагаемое, линейное по интенсивности, получим выражение:

$$\alpha(I) = \alpha \left(1 + \frac{\Delta\sigma_S + (k_{ST}/k_{TS})\Delta\sigma_T}{\hbar\omega(k_{S0} + k_{ST})} I \right) \quad (16)$$

где $\Delta\sigma_S = \sigma_S - \sigma_{S0}$ и $\Delta\sigma_T = \sigma_T - \sigma_{S0}$. Коэффициент поглощения (16) отвечает аппроксимации данных в методе Z-сканирования, так что «пороговая» интенсивность наведенного поглощения, полученная этим методом, будет

$$I_{th} = \frac{\hbar\omega k_{S0} + k_{ST}}{\Delta\sigma_S + \eta\Delta\sigma_T}. \quad (17)$$

Учитывая, что для соединений, проявляющих наведенное поглощение σ_{S0} , как правило, не менее чем на порядок меньшей σ_S и σ_T , то с хорошей степенью точности можно положить $I_{th} \cong I_{cr}$. Таким образом, Z-сканирование позволяет приближенно определить критическую интенсивность наведенного поглощения, однако параметр контраста остается неопределенным.

Как следует из литературы (см., например, обзор [5]), введенные ранее показатели качества наведенного поглощения многоатомных молекул предполагали линейную упорядоченность его эффективности по единственному параметру, например, по отношению сечений $\bar{R} = \sigma_{es}/\sigma_g$ [3], разности $(\sigma_{es} - \sigma_g)$ [2] или по какому-либо иному. Предположение о существовании единственного показателя качества привело в работе [2] к необоснованному утверждению о неадекватности параметра $\bar{R} = \sigma_{es}/\sigma_g$ для характеристики наведенного поглощения соединений XPrIn (где X — Cl, Br или I) и предложению использовать для этой цели параметр $(\sigma_{es} - \sigma_g)$. Действительно, замена аксиального лиганда в соединениях XPrIn слабо влияет на величину параметра \bar{R} , что, однако, не означает, что он не является характеристикой, по которой необходимо сравнивать органические соединения друг с другом. Согласно проведенному выше анализу, для полной характеристики наведенного поглощения единственного параметра недостаточно, так как независимых определяющих параметров наведенного поглощения два. Для ряда фталоцианиновых соединений это иллюстрируется в таблице и на рис. 3. Так что обсуждаемые в работе [2] противоречия не имеют физического смысла.

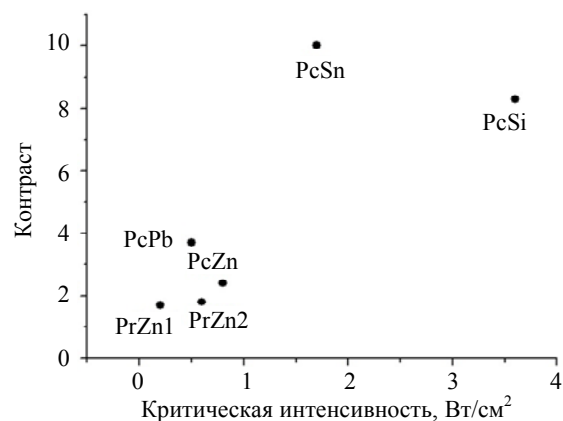


Рис. 3 Сравнительная двухпараметрическая диаграмма эффективности наведенного поглощения исследованных соединений. Порфирины цинка в композите PrZn1 и этилацетате PrZn2

Заключение

Зависимость пропускания оптического элемента, активированного органическими соединениями, проявляющими наведенное поглощение, однозначно определяется тремя параметрами: контрастом, критической интенсивностью и начальным пропусканием. Два из них — контраст и критическая интенсивность — являются определяющими параметрами наведенного поглощения органических соединений. Для их корректного определения необходимо проведение исследования пропускания от плотности энергии в условиях стационарного распределения электронов по энергетическим уровням молекулы. Кроме того, необходимо, чтобы измерение пропускания было осуществлено в линейном режиме, в области насыщения поглощения органического соединения, а также при каком-либо промежуточном значении плотности энергии лазерного излучения. Развитые представления адекватно описывают экспериментальные данные, представленные в литературе.

ЛИТЕРАТУРА

- Hollins R. C. // Current Opinion in Solid State and Materials Science. 1999. V. 4. No. 2. P. 189.
- Shirk J. S. et al. // The Journal of Physical Chemistry A. 2000. V. 104. No. 7. P. 1438.
- Perry J. W. et al. // Optics Letters. 1994. V. 19. No. 9. P. 625.
- Li Y. et al. // The Journal of Physical Chemistry A. 2008. V. 112. No. 31. P. 7200.
- O'Flaherty S. M. et al. // Advanced Materials. 2003. V. 15. No. 1. P. 19.
- Mansour K. et al. // Proc. SPIE. 1993. V. 1853. P. 132.
- Yüksek M. et al. // Journal of Optics. 2010. V. 12. No. 1. P. 015208.
- Долотов С. М., Колдунов Л. М. и др. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 1. С. 39.

9. Lepkowicz R. et al. // JOSA B. 2002. V. 19. No. 1. P. 94.
 10. Шефер Ф. П., в книге "Лазеры на красителях". — М. Мир, 1976.
 11. Shiliang Qu, Yu Chen et al. // Materials Letters. 2001. V. 51. No. 6. P. 534.
 12. García-Frutos E. M. et al. // Synthetic Metals. 2003. V. 137. No. 1–3. P. 1479.
 13. Sanghadasa M. et al. // Journal of Applied Physics. 2001. V. 90. No. 1. P. 31.
 14. Sheik-Bahae M. et al. // Quantum Electronics, IEEE Journal of. 1990. V. 26. No. 4. P. 760.

Figures of merit for excited state absorption of organic compounds

M. F. Koldunov^{1,2,3} and L. M. Koldunov^{1,2}

¹Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
 38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
 E-mail: modest@ran.gpi.ru

²MIPT
 9 Institutskiy al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

³The Peter the Great Military Academy of Strategic Missile Forces
 9 Kitaygorodsky av., Moscow, 109074, Russia

Received September 7, 2015

The excited state absorption of organic dyes was analyzed on the basis of the rate equations. It is shown that the excited state absorption is characterized by two figures of merit namely: contrast parameter and critical intensity. The comparison of the experimental data with the numerical calculation shows that the developed conception gives adequate description of the excited state absorption of the organic compounds. The figures of merit for excited state absorption of organic dyes of phthalocyanine series (PcPb, PcZn, PcSn, PcSi) and porphyrin zinc is calculated.

PACS 42.70.hj; 42.65.-k; 42.70.-a.

Keywords: excited state absorption, organic dye, phthalocyanine, figure of merit.

REFERENCES

1. R. C. Hollins, Current Opinion in Solid State and Materials Science **4**, 189 (1999).
2. J. S. Shirk et al., The Journal of Physical Chemistry A **104**, 1438 (2000).
3. J. W. Perry et al., Optics Letters **19**, 625 (1994).
4. Y. Li et al., The Journal of Physical Chemistry A **112**, 7200 (2008).
5. S. M. O'Flaherty et al., Advanced Materials **15**, 19 (2003).
6. K. Mansour et al., Proc. SPIE **1853**, 132 (1993).
7. M. Yükses et al., Journal of Optics **12**, 015208 (2010).
8. S. M. Dolotov, L. M. Koldunov, et al., Quant. Electronics **42** (1), 39 (2012).
9. R. Lepkowicz et al., JOSA B. **19** (1), 94 (2002).
10. F. P. Shefer, in Book "Lasers on Colors" (Mir, Moscow, 1976) [in Russian].
11. Qu Shiliang, Yu Chen et al., Materials Letters **51**, 534 (2001).
12. E. M. García-Frutos et al., Synthetic Metals **137**, 1479 (2003).
13. M. Sanghadasa et al., Journal of Applied Physics **90**, 31 (2001).
14. M. Sheik-Bahae et al., Quantum Electronics, IEEE Journal **26**, 760 (1990).