

Ограничитель интенсивности лазерного излучения на основе полиметиновых красителей

Т.Н.Копылова, А.П.Луговский, В.М.Подгаецкий, О.В.Пономарева, В.А.Светличный

Экспериментально исследованы нелинейные оптические свойства серии полиметиновых красителей (ПК 7005, 7006, 7031 и 7098) с закрепленной полиметиновой цепью в молекулярной структуре соединений при возбуждении сфокусированным излучением второй гармоники наносекундного Nd:YAG-лазера. Выявлен краситель ПК 7098 с минимальным линейным поглощением в большей части видимого спектра и наиболее сильным нелинейным обратным насыщенным поглощением, в этанольном растворе которого коэффициент ослабления лазерного излучения $K = 14$ при интенсивности 100 МВт/см^2 . Проведена оптимизация характеристик однокаскадного ограничителя (лимитера) интенсивности мощного лазерного излучения, состоящего из двух софокусно расположенных линз с фокусным расстоянием 5.5 см. Наибольшие измеренные значения коэффициента ослабления составили 420 (начальное пропускание $T_0 \approx 50\%$) и 170 ($T_0 \approx 70\%$). По данным экспериментов оценены сечения синглет-синглетного поглощения исследованных соединений. Особенностью рассмотренного эффективного лимитера является его широкий рабочий диапазон в видимой области спектра при повышенной долговечности рабочего вещества

Ключевые слова: лазер, нелинейное поглощение, ограничение интенсивности излучения, однокаскадный лимитер, полиметиновый краситель, сечение поглощения.

1. Введение

Бурное развитие мощной импульсной лазерной техники в последние десятилетия и широкое ее внедрение в различные сферы человеческой деятельности привело к необходимости решения задачи динамической защиты органов зрения и сенсоров оптического излучения. Очевидная актуальность этой проблемы вызвана заметным возрастанием интенсивности излучения лазерных дальномеров, целеуказателей и подобных им приборов, работающих в широкой области спектра. Практика применения лазеров, несмотря на ратификацию ведущими странами Международного конвенционного протокола от 05.10.99 «О запрещении лазерного оружия ослепляющего действия», может иметь нежелательным следствием серьезные заболевания персонала и разрушение чувствительных элементов оптических сенсоров.

Динамическое ограничение (лимитирование) интенсивности мощного лазерного излучения может быть до-

стигнуто многими способами, для чего полезными могут оказаться и модифицированные схемы традиционных лазерных затворов. На практике более удобны пассивные лимитеры, в состав которых входят органические (металлоорганические) и неорганические материалы, затемняющиеся под действием мощного оптического излучения или резко усиливающие рассеяние (а также фокусирование либо расфокусирование) проходящего света. В качестве материалов лимитеров обычно используются жидкостные растворы, полимерные блоки и пленки органических красителей и фуллеренов, а также суспензии углеродных и металлических микро- и наночастиц и нанотрубок [1, 2].

К преимуществам материала лимитера, представляющего собой жидкостный раствор красителя (фуллерена), относится возможность сравнительно быстрого «залечивания» зоны лазерного воздействия, к обычным недостаткам – окрашенность рабочего вещества в его исходном состоянии, мешающая правильному зрительному восприятию оператора оптического прибора или сужающая область спектральной чувствительности оптического сенсора. В то же время практически неселективные суспензии углеродных частиц обладают свойством агрегации (особенно под действием излучения), значительно изменяющей их оптические свойства. Твердые материалы лимитеров, в которых не работает механизм «залечивания» зоны лазерного воздействия, менее долговечны, чем жидкостные.

В двухкаскадной схеме лимитера лазерного излучения ($\lambda = 532 \text{ нм}$) были достигнуты высокие значения коэффициента ослабления лазерного излучения $K = T_0/T = (2 - 3) \times 10^4$ (где T_0 – линейное (начальное) пропускание лимитера, а T – пропускание при заданной интенсив-

Т.Н.Копылова, В.А.Светличный. Сибирский физико-технический институт им. В.Д.Кузнецова при Томском государственном университете, Россия, 634050 Томск, пл. Новособорная, 1; e-mail: kopylova@phys.tsu.ru; svet@elefot.tsu.ru

А.П.Луговский. НИИ прикладных физических проблем при Белорусском государственном университете, Белоруссия, 220064 Минск, ул. Курчатова, 7; e-mail: chemlaba@tut.by

В.М.Подгаецкий. Московский государственный институт электронной техники (технический университет), Россия, 124498 Москва, Зеленоград, пр. 4806, 5; e-mail: bms@miee.ru

О.В.Пономарева. ООО «Научно-производственная фирма ДЕЛТА-КОР», Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, ул. Первомайская, 44

Поступила в редакцию 25 августа 2005 г., после доработки – 17 января 2006 г.

ности падающего излучения [3]). В первом каскаде такого лимитера ослабление излучения происходило в плазме оптического пробоя в кювете с сероуглеродом CS_2 , а во втором каскаде – в кювете, заполненной раствором красителя фталоцианина свинца PcPb в CHCl_3 либо суспензией углеродных микрочастиц. В более широкой области спектра $\lambda = 485 - 680$ нм коэффициент K (с суспензией микрочастиц во втором каскаде) не превышал ~ 1000 .

К указанным выше недостаткам схемы рассматриваемого лимитера добавляется однократность его действия, что вряд ли приемлемо для реального применения. В целом, несмотря на интерес научного мира к проблеме ограничения интенсивности лазерного излучения, этот недостаток пока никак не может быть устранен практически.

По этой причине в настоящее время ведутся интенсивные поиски новых рабочих материалов ограничителей оптического излучения, имеющих необходимые нелинейные свойства, а также эффективных схем лимитеров. Среди физических механизмов, приводящих к нелинейному ослаблению интенсивности излучения в материале лимитера, одним из наиболее низкопороговых и эффективных является нелинейное обратное насыщенное поглощение (reverse saturable absorption – RSA) – механизм, основанный на наведенном поглощении из возбужденных синглетных или триплетных состояний среды [4]. Необходимое условие существования RSA-механизма в конкретном веществе – превышение сечения наведенного поглощения σ_{ik} над сечением обычного (линейного) поглощения σ_{01} из основного состояния в спектральной области генерации действующего лазера.

Из органических и металлоорганических соединений, в которых ограничение интенсивности лазерного излучения происходит по RSA-механизму, стоит отметить фталоцианины, фуллерены, замещенные дициаминометилепирана (ДЦМ) и полиметиновые (цианиновые) красители (ПК) [1, 5–10]. Первые два класса соединений в основном ограничивают интенсивность лазерного излучения за счет поглощения в канале триплетных состояний, а остальные – за счет синглет-синглетного поглощения. Синглет-синглетный механизм, как правило, обеспечивает большее быстроедействие среды. По этой причине ПК находят широкое применение в лазерах с УКИ при синхронизации мод.

К характерным свойствам ПК с длинной полиметиновой цепью (ПЦ) относится наличие ИК полос поглощения. Увеличение длины ПЦ и эффективной длины π -электронной системы в хромофорных концевых группах молекул приводит к длинноволновому смещению этих полос, что позволяет согласовывать область поглощения ПК с длиной волны возбуждающего лазера.

Отсутствие заметного поглощения ряда ПК в видимой области спектра может иметь следствием их существенное преимущество перед многими другими материалами лимитеров лазерного излучения. Значительное снижение линейного поглощения лимитеров на основе ПК, вплоть до достижения их практической бесцветности в исходном состоянии, способно обеспечить хорошую совместимость лимитеров с другими элементами распространенных оптических приборов.

В одних из первых работ по исследованию нелинейного поглощения в ПК изучались свойства двух видов соединений [5, 6]. В красителях первого вида имелась ПЦ из 1–3 звеньев (СН = СН-групп) с различным составом концевых групп (длина волны максимума длинноволно-

вой полосы поглощения ПК $\lambda_{\text{max}} = 550 - 750$ нм), а ПК второго вида имели более сложную закрепленную ПЦ с 3–6 звеньями ($\lambda_{\text{max}} = 640 - 840$ нм).

В экспериментах по ограничению интенсивности излучения второй гармоники Nd:YAG-лазера ($\lambda = 532$ нм, $T_0 = 70\% - 80\%$, длительность импульса $\tau = 10$ нс, плотность энергии излучения $W \leq 10$ Дж/см²) лучшие результаты были получены с растворами ПК второго вида PD1 и PD3 ($\lambda_{\text{max}} = 750 - 780$ нм) в этаноле и полиуретанакрилате. Максимальные значения K составляли ~ 4 для пикосекундных импульсов и 5–7 для наносекундных.

В опытах по z -сканированию были получены близкие к указанным выше значения K , причем для наносекундных лазерных импульсов одни и те же K достигались при значениях W , примерно в 4 раза больших, чем в случае пикосекундных импульсов, что связывалось с влиянием переходов молекул на систему возбужденных синглетных уровней, возникающих при конформационной изомеризации молекул соединений.

Фотостабильность ПК второго вида была существенно выше, чем у ПК первого вида (эффект закрепления ПЦ). На фотостабильность ПК заметно влияла поляризация лазерного излучения: при круговой поляризации она была выше, чем при линейной.

Согласно [5] выражение для плотности энергии излучения W_d , прошедшего через слой вещества лимитера толщиной d , может быть представлено в виде

$$W_d = \frac{W \exp(-\alpha d)}{1 + (\sigma_{12} - \sigma_{01})W[1 - \exp(-\alpha d)]/(2\hbar\omega)}, \quad (1)$$

где α – линейный показатель поглощения; σ_{12} – сечение поглощения при переходах молекул между первым и вторым возбужденными синглетными уровнями S_1 и S_2 ; \hbar – постоянная Планка; ω – частота излучения. Выражение (1) справедливо при не слишком больших значениях W , когда можно пренебречь эффектом насыщения.

В [6] было получено наибольшее для всех известных материалов лимитеров отношение $\sigma_{12}/\sigma_{01} \approx 200$. Область значений $\sigma_{12}/\sigma_{01} > 1$, где возможен RSA-механизм, находилась в диапазоне $\lambda = 440 - 650$ нм. Время жизни возбужденных состояний исследованных соединений составляло 1 нс в этаноле и 3 нс в полиуретанакрилате, так что характерное время срабатывания лимитеров не превышало 1 нс.

В работе [7] были найдены значения $\sigma_{\text{eff}}/\sigma_{01}$ (σ_{eff} – эффективное сечение поглощения возбужденными молекулами) для пяти диалкилкарбоцианиновых ПК ($\lambda_{\text{max}} = 420 - 775$ нм). Они возрастали от 0.3 до 5.3 при увеличении длины ПЦ от 1 до 3 звеньев. С ростом длины ПЦ возрастали также λ_{max} и K . Наибольшее $K \approx 15$ достигалось при использовании раствора трикарбоцианина в диметилсульфоксиде ($\lambda_{\text{max}} \approx 775$ нм, трехзвенная ПЦ).

Заметное ослабление видимого лазерного излучения для растворов трикарбоцианиновых ПК ($\lambda_{\text{max}} \approx 680$ нм, трехзвенная ПЦ) в этаноле, пропиленгликолькарбонате (ПГК) и полимерной матрице ПММА было получено в [9, 10], где максимальное значение K составило ~ 15 ($\lambda = 532$ нм, $T_0 = 70\%$, $\tau = 6$ нс, $W \leq 2.5$ Дж/см²). В опытах по z -сканированию (схема $F/10$, где $F = 10$ см – фокусное расстояние линзы) с раствором наиболее эффективного ПК № 5 в ПГК было достигнуто $K \approx 70$. В эксперименте не было обнаружено наведенного триплет-триплетного поглощения в молекулах ПК, что под-

тверждало предположение о малом влиянии триплетных состояний на ограничение интенсивности лазерного излучения.

Измеренные значения молекулярной фотостабильности γ (отношение числа распавшихся молекул к числу поглощенных фотонов) растворов ПК при лазерном облучении в видимой области спектра ($\lambda = 532$ нм) составляли примерно 1.5×10^{-5} мол./фот., а при облучении в УФ области ($\lambda = 308$ нм) – примерно 1.2×10^{-3} мол./фот. При облучении 100 лазерными импульсами ($\lambda = 532$ нм, $T_0 = 70\%$, $\tau = 6$ нс, $W = 1.2$ Дж/см²) с частотой повторения $f = 1$ Гц полимерного лимитера на основе ПК № 5 его спектральные свойства и внешний вид не изменились, хотя дальнейшее облучение образца приводило к появлению микрповреждений на его поверхности. При снижении величины W до 0.6 Дж/см² (фокус линзы с $F = 6$ см расположен на расстоянии 5 мм за задней поверхностью образца) его разрушения не наблюдалось и после облучения 500 лазерными импульсами. В такой схеме $K = 22$.

2. Объекты и результаты исследования

В настоящей работе изучено нелинейное поглощение четырех новых красителей – ПК 7005, 7006, 7031 и 7098 с закрепленной семизвенной ПЦ. Структурные формулы этих соединений даны на рис.1, где для сравнения показана структура молекул наиболее эффективных ПК (PD3 и № 5) из [6, 9]. Архитектура молекул исследованных ПК, как и PD3, более сложна, чем у соединения № 5 с простой ПЦ. В структуре всех молекул на рис.1 присутствует один и тот же противоион ClO_4^- .

Из рис.2, на котором приведены спектры поглощения ПК, видно, что всем соединениям, представленным на рис.1, присуще интенсивное поглощение в ближней ИК

области спектра. Максимальный коэффициент экстинкции ϵ_{max} в длинноволновой полосе поглощения составляет $\sim 2 \times 10^5$ л·моль⁻¹·см⁻¹. Линейное поглощение исследованных ПК (как и PD3) мало во всем видимом диапазоне длин волн. Следующие интенсивные полосы поглощения лежат только в спектральной области $\lambda < 400$ нм.

Сопоставление рис.1 и 2 показывает, что циклизация центральной части ПЦ ортофениленовым мостиком (ПК 7006, 7008 и 7031) практически не оказывает влияния на положение максимума полосы поглощения ПК с незакрепленной ПЦ. Это связано со взаимной компенсацией влияния коротковолнового сдвига полосы при 3,5-замещении ортофениленового цикла и длинноволнового сдвига за счет 4-хлор-заместителя. Замещение у атома азота гетероцикла не оказывает воздействия на спектральные характеристики, влияя лишь на растворимость соединения. В то же время циклизация ПЦ насыщенным 3,5-триметиленовым мостиком привела к значительному длинноволновому сдвигу полосы поглощения ПК 7098 по сравнению с красителем близкой структуры ПК 7031. Отметим также, что красители с индолениновыми концевыми группами фотохимически более устойчивы, чем хинолиновые трикарбоцианины.

Нелинейное поглощение этанольных растворов ПК с концентрацией ~ 1 ммоль/л исследовалось при возбуждении в кварцевой кювете толщиной 5 мм излучением второй гармоники Nd:YAG-лазера ($\lambda = 532$ нм, $T_0 = 70\%$, $\tau = 15$ нс, энергия излучения $E = 0.1$ Дж). Фокусировка излучения осуществлялась линзой с $F = 60$ см. Апертура измерителя энергии излучения, прошедшего через кювету, превышала размер пучка лазера в ~ 4 раза.

На рис.3 приведены зависимости пропускания растворов соединений от интенсивности возбуждающего из-

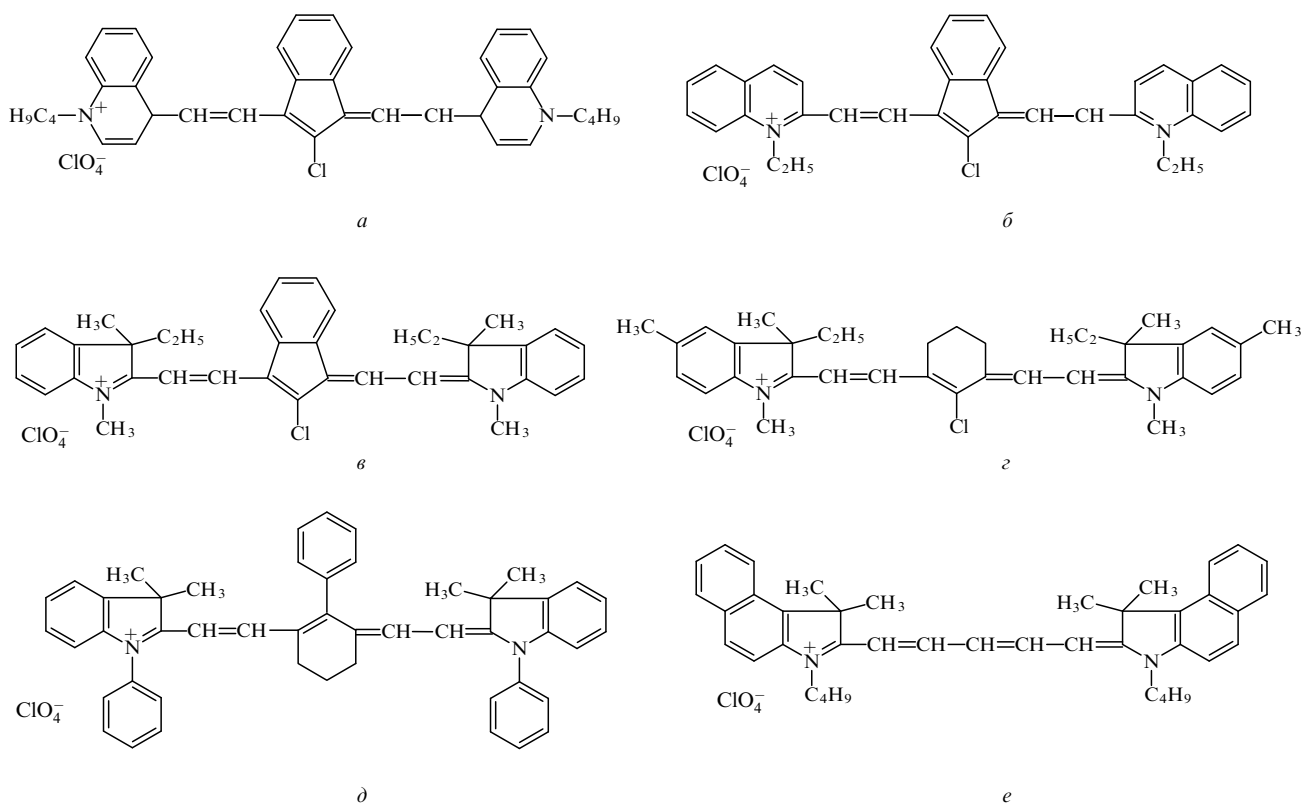


Рис.1. Структурные формулы красителей ПК 7005 (а), 7006 (б), 7031 (в) и 7098 (з), а также PD3 [5] (д) и соединения № 5 [9] (е).

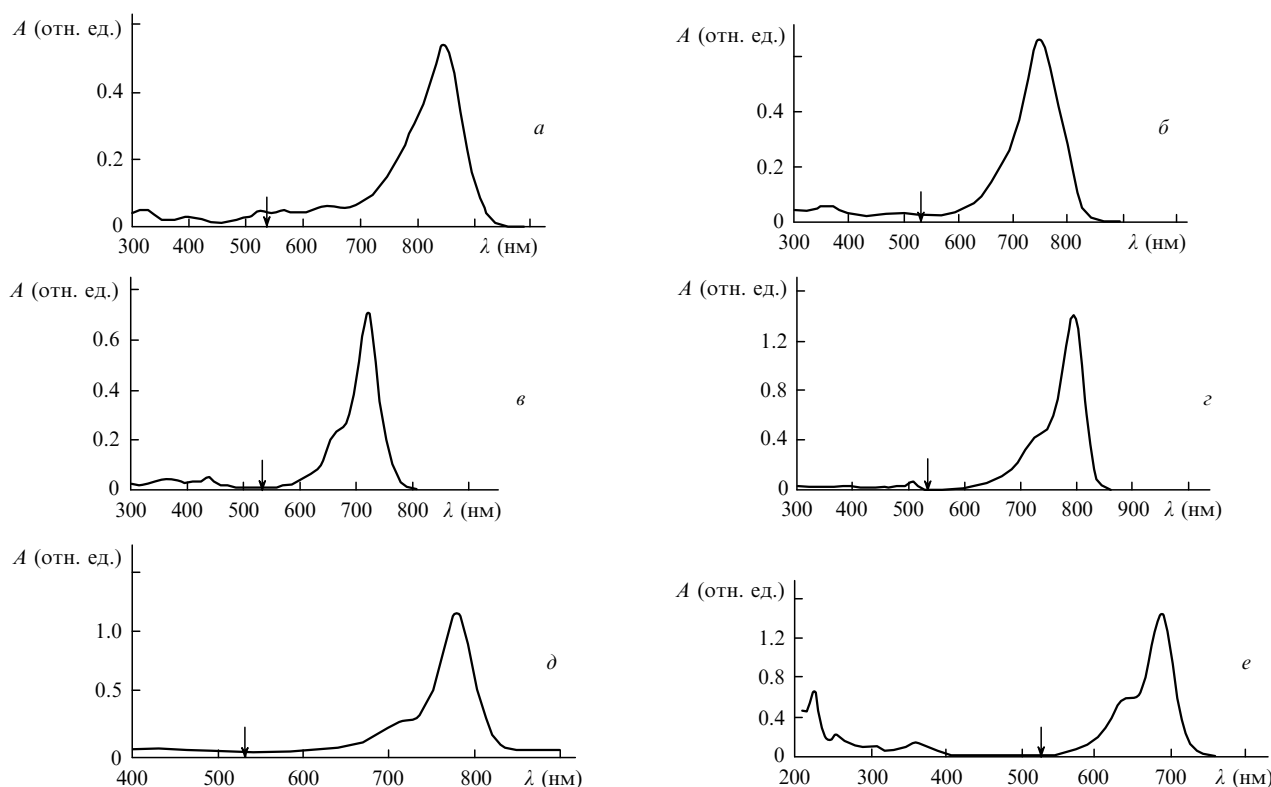


Рис.2. Спектры поглощения A растворов красителей ПК 7005 (а), 7006 (б), 7031 (в) и 7098 (г), а также PD3 [5] (д) и соединения № 5 [8] (е) в этаноле (а–г), полиуретанакрилате (д) и ПГК (е). Стрелками показано положение длины волны возбуждающего излучения ($\lambda = 532$ нм).

лучения I . Видно, что наибольшее нелинейное поглощение имеет краситель ПК 7098, для которого $K = 22$ при $I = 100$ МВт/см², в то время как для остальных красителей $K = 2 - 3$. Стоит отметить, что для красителя ПК 7098 имеет место благоприятная ситуация – минимальное линейное поглощение на длине волны возбуждающего излучения 532 нм (коэффициент экстинкции $\epsilon = 400$ л·моль⁻¹·см⁻¹). Поскольку способность молекулы к нелинейному ослаблению лазерного излучения определяется отношением сечений поглощения молекул в возбужденном и основном состояниях σ_{12}/σ_{01} , то при малых σ_{01} даже небольшое наведенное поглощение приводит к значительному лимитирующему эффекту.

Для других красителей, исследованных в настоящей работе (как и для ПК, изученных нами ранее [9, 10]), линейное поглощение для $\lambda = 532$ нм существенно выше: $\epsilon \geq 2000$ л·моль⁻¹·см⁻¹. Следовательно, для достижения высокого коэффициента ослабления в этих соединениях требуется, чтобы сечение поглощения молекулами в возбужденном состоянии σ_{12} было существенно больше, чем у ПК 7098.

Измеренные для $\lambda = 532$ нм значения молекулярной фотостабильности γ этанольных растворов исследованных красителей представлены в табл.1. Они менялись от $\sim 4 \times 10^{-5}$ (ПК 7005) до $\sim 10^{-7}$ мол./фот. (ПК 7031). Таким образом, фотостабильность соединений росла при наличии и увеличении числа стягивающих групп в структуре молекул (см. рис.1). Стабильность соединений заметно выше в случае дегазации (обескислороженности) растворов. Необходимо отметить, что все рассмотренные ПК имели низкий квантовый выход флуоресценции – менее 0.1.

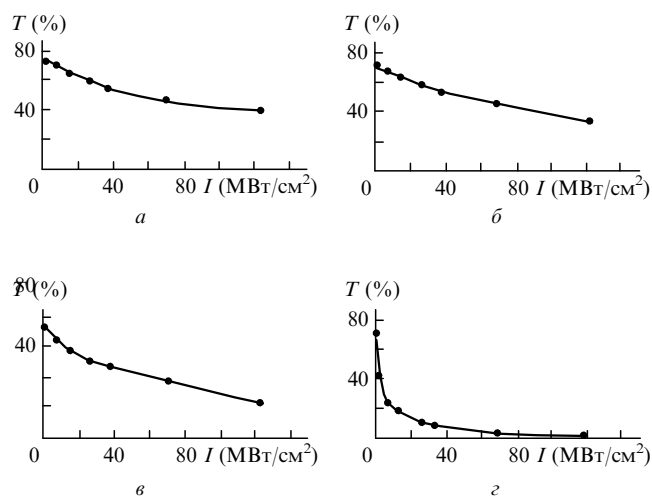


Рис.3. Зависимости от интенсивности возбуждающего излучения I ($\lambda = 532$ нм) пропускания T этанольных растворов красителей ПК 7005 (а), 7006 (б), 7031 (в) и 7098 (г).

Табл.1. Измеренные молекулярные фотостабильности γ и результаты расчета сечений поглощения для переходов между основным и первым возбужденным синглетными состояниями σ_{01} , между первым и вторым синглетными состояниями σ_{12} , а также отношения σ_{12}/σ_{01} для ПК ($\lambda = 532$ нм).

Краситель	γ (мол./фот.)	σ_{01} (10^{-18} см ²)	σ_{12} (10^{-17} см ²)	σ_{12}/σ_{01}
ПК 7005	4×10^{-5}	8	1.2	1.5
ПК 7006	1.8×10^{-6}	8	1	1.25
ПК 7031	10^{-7}	8	1.2	1.5
ПК 7098	8×10^{-7}	1..5	4 (3)	25 (20)

Примечания. Жирным шрифтом выделено значение γ для обескислороженного раствора; в скобках указаны результаты расчета по формуле (4).

3. Однокаскадный лимитер

Результаты измерений характеристик однокаскадного софокусного лимитера, оптическая схема которого показана на рис.4, приведены в табл.2. Лимитер состоял из двух софокусно расположенных линз Л1 и Л2 ($F = 5.5$ см), ирисовой диафрагмы Д и кварцевой кюветы К с этанольным раствором ПК 7098. Кварцевые кюветы толщиной $h = 0.5 - 5$ см могли перемещаться вдоль оптической оси лимитера. Исследования проводились с Nd:YAG-лазером ($\lambda = 532$ нм, $E = 0.14$ Дж, $\tau = 15$ нс, диаметр пучка $d_b = 0.5$ см). При расстоянии $H = 4.5$ см между кюветой и линзой Л1 происходило разрушение входного окна кюветы, а при отсутствии кюветы в фокусе линзы наблюдался оптический пробой в воздухе.

Максимальное ослабление лазерного излучения достигается, если поглощающий элемент лимитера с наименьшей толщиной h поместить вблизи фокуса линзы Л1. Такой лимитер будет иметь низкий энергетический порог срабатывания, однако динамический диапазон устройства будет невелик из-за быстрого лучевого разрушения лимитера при увеличении интенсивности падающего излучения. Этот эффект может усиливаться при больших частотах f за счет тепловых механизмов еще до достижения предела лучевой стойкости кварцевых окон кюветы.

Таким образом, активный элемент должен быть протяженным, чтобы поглощенная энергия рассеивалась в значительном объеме. В то же время интенсивность излучения на всей длине элемента должна быть достаточной для эффективного ослабления излучения.

Анализ данных измерений K , представленных в табл.2, показывает следующее. При $T_0 = 70\%$, когда $h = 0.5$ см и кювета располагалась вблизи фокальной плоскости линзы Л1 ($H = 4$ см), было получено $K = 174$. Это соответствовало достаточно жестким условиям работы лимитера. Увеличение энергии импульса лазерного излучения в ~ 1.5 раза приводило к разрушению устройства. При более «мягкой» фокусировке резко снижалась эффективность работы лимитера. С увеличением h до 1 см условия работы лимитера лишь незначительно улучшались, при этом максимальное значение K снижалось до 140 ($H = 4$ см).

Более предпочтительным оказался лимитер с $h = 2$ см. В этом случае коэффициент ослабления несколько увеличился, а его максимальное значение составило 140 ($H = 4$ см). При уменьшении H коэффициент K снижался медленнее, чем в первых двух случаях, и при $H = 3$ см он еще был равен 100 – хорошее значение для однокаскадного лимитера с $T_0 = 70\%$. При этом энергию лазера можно было увеличить в 3–4 раза без разрушения лимитера.

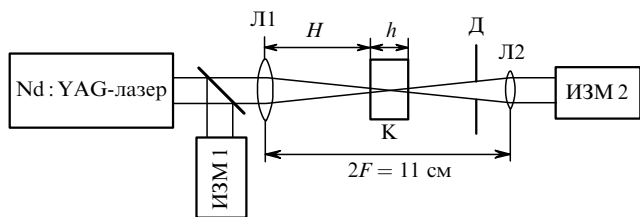


Рис.4. Схема однокаскадного оптического лимитера: Л1, Л2 – сферические линзы; Д – ирисовая диафрагма; К – кювета с активной средой лимитера; ИЗМ 1, ИЗМ 2 – калориметрические измерители КТП-2 или ИМО-2Н.

Табл.2. Коэффициент ослабления K лимитера на основе ПК 7098 при различных начальном пропускании T_0 , толщине кюветы h и положении активной среды относительно линзы Л1 (величине H).

T_0 (%)	h (см)	H (см)	K
48	1	0.8	37
		2	68
		3	152
		3.5	200
		4	405
50	2	0.8	49
		2	105
		3	210
		3.5	280
		4	420
51	5	0.8	86
		2	260
70	0.5	0.8	18
		2	33
		3	67
		3.5	109
72	1	0.8	20
		2	36
		3	71
		3.5	103
70	2	0.8	27
		2	49
		3	100
		3.5	126
70	4	4	140

Аналогичная закономерность наблюдалась при $T_0 \approx 50\%$. Лучшие результаты были получены для кюветы с $h = 1 - 2$ см, а рост h до 5 см приводил к существенному падению эффективности лимитирования, поскольку в значительной части среды излучение было недостаточно интенсивным.

4. Обсуждение результатов

Выражение для среднего за импульс пропускания лимитера T вследствие нелинейного поглощения в приближении трехуровневой схемы при наносекундном возбуждении можно представить в виде

$$T(I) \approx \exp\{-N_0(I)\sigma_{01} + N_1(I)\sigma_{12}\}h, \tag{2}$$

где N_0 и N_1 – концентрации молекул соответственно в основном состоянии S_0 и на уровне S_1 , причем $N_0 + N_1 = N_{tot}$ (где N_{tot} – полная концентрация молекул).

Если нет никаких коллективных эффектов, нелинейное пропускание материала лимитера зависит от произведения концентрации молекул на длину оптического пути. Следовательно, в случае коллимированного лазерного пучка пропускание $T(I)$ для образцов с разной концентрацией, но одинаковым T_0 (в достаточно большом диапазоне концентраций N_{tot}) будет одинаковым. При фокусировке излучения диаметр пучка d_b при прохождении исследуемого оптического слоя может значительно изменяться, соответственно меняется и I . Поэто-

му нелинейное поглощение может быть существенно различным для образцов с одинаковым T_0 , но разной толщиной h .

С учетом того, что $T_0 = \exp(-\alpha d)$, приведенное выше соотношение (1) можно представить в более удобном виде:

$$T(d) = \frac{T_0}{1 + (1 - T_0)(\sigma_{12} - \sigma_{01})W/(\hbar\omega)}. \quad (3)$$

В случае $\sigma_{12} \gg \sigma_{01}$ и соответственно $K \gg 1$ из (3) имеем

$$K \approx \frac{(1 - T_0)\sigma_{12}W}{2\hbar\omega}. \quad (4)$$

Таким образом, ослабление лазерного излучения в материале лимитера увеличивается при снижении его линейного пропускания, а коэффициент ослабления прямо пропорционален произведению сечения поглощения при переходах молекул между возбужденными синглетными уровнями и плотности энергии падающего излучения.

Соотношения (3) и (4) могут использоваться для оценки σ_{12} по экспериментальным зависимостям рис.3 с учетом того, что $\sigma_{01} = 2.3 \times 10^3 \varepsilon/N_A$, где N_A – число Авогадро. Результаты расчета σ_{01} , σ_{12} и σ_{12}/σ_{01} по формуле (3) представлены в табл.1 для всех исследованных ПК. Для ПК 7098 в скобках даны также результаты расчета σ_{12} и σ_{12}/σ_{01} по формуле (4), мало отличающиеся от рассчитанных по формуле (3).

Как видно из табл.1, преимущество ПК 7098 объясняется большими, чем у других рассмотренных соединений, значениями σ_{12} и σ_{12}/σ_{01} . Несмотря на примерно в 10 раз меньшее, чем у соединения PD3, отношение σ_{12}/σ_{01} для ПК 7098, полученные значения K значительно больше найденных в [5, 6] для PD3, хотя использованные нами интенсивности I были существенно меньше. Отметим, что значения T и K , рассчитанные по формулам (3) и (4), достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными выше.

5. Заключение

Исследовано нелинейное поглощение четырех фотостабильных ПК при импульсном возбуждении излучением второй гармоники наносекундного ИАГ: Nd-лазера. Лучшие лимитирующие свойства имеет краситель ПК 7098 с минимальным линейным поглощением в большей части видимого спектра и наиболее сильным нелинейным поглощением. Коэффициент ослабления лазерного излучения K для этанольного раствора ПК 7098

равен 14 при интенсивности падающего излучения $I = 100$ МВт/см². Проведена оптимизация расположения и размера среды эффективного однокаскадного лимитера на основе ПК 7098. Наибольшие измеренные значения K такого лимитера составили 420 ($T_0 \approx 50\%$) и 170 ($T_0 \approx 70\%$). Рассчитаны сечения синглет-синглетного поглощения исследованных соединений. Особенностью описанного эффективного лимитера является его широкий рабочий диапазон в видимой области спектра при повышенной долговечности рабочего вещества, определяемой молекулярной фотостабильностью красителя.

Обращает на себя внимание возможность применения ПК для защиты биологических тканей и органов зрения от действия рассеянного (отраженного) излучения мощных медицинских ИК лазеров [11]. Некоторые из этих красителей могут оказаться практически нетоксичными и вполне совместимыми с биологическими тканями, аналогично известному ПК индоцианину зеленому (кардиоину) [12].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 04-01-08015 и 04-02-16515), Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (государственный контракт № 2900р/3642), Министерства образования и науки РФ (проекты № 15459 и 4175) и совместной Российско-американской программы BRNE (грант Y2-P-16-01).

1. Tutt L.W., Boggess T.F. *Progr. Quantum Electron.*, **17**, 299 (1993).
2. Sun X., Yu R.Q., Xu G.Q., Hor T.S.A., Ji W. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 3632 (1998).
3. Hernandez F.E., Shensky W. III, Cohanoschi I., Van Stryland E.W. *Laser Focus World*, No. 11, 125 (2001).
4. Guliano C.R., Hess L.D. *IEEE J. Quantum Electron.*, **3**, 358 (1967).
5. Przhonska O.V., Lim J.H., Hagan D.J., Van Stryland E.W., Bondar M.V., Slominsky Y.L. *J. Opt. Soc. Am. B*, **15**, 802 (1998).
6. Lim J.H., Przhonska O.V., Khodja S., Yang S., Ross T.S., Hagan D.J., Van Stryland E.W., Bondar M.V., Slominsky Y.L. *Chem. Phys.*, **245**, 79 (1999).
7. Bonner C.E., La Quieta H., Haliburton J.H., Sun S.S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4106**, 272 (2000).
8. Белоусов В.П., Белоусова И.М., Гавронская Е.А., Григорьев В.А., Данилов О.Б., Калинин А.Г., Краснопольский В.Е., Смирнов В.А., Соснов Е.Н. *Оптика и спектроскопия*, **87**, 845 (1999).
9. Копылова Т.Н., Светличный В.А., Майер Г.В., Резниченко А.В., Подгаецкий В.М., Пономарева О.В., Самсонова Л.Г., Филинов Д.Н., Помогаев В.А., Тельминов Е.Н., Лапин И.Н., Светличная Н.Н., Синченко Е.И. *Квантовая электроника*, **33**, 967 (2003).
10. Светличный В.А., Светличная Н.Н., Синченко Е.И., Вайтулович Е.А., Лапин И.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **16**, 747 (2003).
11. Podgaetsky V.M., Kopylova T.N., Reznichenko A.V., Tereshchenko S.A. *Dig. IX Int. Conf. LALS (Vilnius, 2002, p. 59)*.
12. Riefke B., Licha K., Semmler W. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2927**, 199 (1996).