

НИЗКОПОРОГОВОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ МОЩНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ С СЕНСИБИЛИЗИРОВАННОЙ АНТИСТОКСОВОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЕЙ

© 2009 г. М. С. Смирнов, канд. физ.-мат. наук; О. В. Овчинников, канд. физ.-мат. наук; П. В. Новиков; А. Н. Латышев, доктор физ.-мат. наук; М. А. Ефимова, канд. физ.-мат. наук

Воронежский государственный университет, Воронеж
E-mail: opt@phys.vsu.ru

Показана принципиальная возможность реализации низкопорогового ограничения мощности в обладающих сенсибилизированной антистоксовой люминесценцией ионно-ковалентных кристаллах с адсорбированными структурами типа “кластер металла – молекула красителя”. Для диспергированных в желатиновую матрицу нанокристаллов AgCl(I) размером 40–70 нм с адсорбированными молекулами красителей и малоатомными кластерами серебра при температуре 77 К обнаружен и исследован эффект ограничения мощности для излучения с $\lambda = 660$ нм. Эффект наблюдался для излучения плотностью 10^{17} – 10^{19} квант/см²с при длительности импульса 1 мс. С помощью техники Z-сканирования установлено, что основным механизмом ограничения является самофокусировка, возникающая вследствие изменения показателя преломления среды при изменении концентрации электронов на ловушках в запрещенной зоне нанокристаллов.

Ключевые слова: оптические переключатели, низкопороговые ограничители мощности излучения, ионно-ковалентные кристаллы с адсорбированными металлоорганическими структурами.

Коды OCIS: 140.3360, 160.4330, 190.59.70

Поступила в редакцию 12.03.2009

Введение

В настоящее время отмечается резкий рост исследований, посвященных созданию таких оптоэлектронных систем, как оптические переключатели и ограничители мощности оптического излучения [1–13]. Однако большинство из предложенных для этих целей материалов проявляют свои нелинейные свойства при мощностях излучения, приближающихся к порогу разрушения материала ограничителя. Это обуславливает их эффективное применение только в импульсном режиме работы при характерных временах пико- и наносекундного диапазона. Вместе с тем, при решении таких задач, как защита глаз человека и фотоприемных устройств от разрушения, формирование систем передачи и обработки информации оптическими методами и проч., требуются низкопороговые ограничители мощности, в том числе и работающие при длительных световых импульсах и даже в непрерывном режиме.

В ряде работ показано, что существенного снижения порога срабатывания удается достичь

в кристаллах широкозонных полупроводников с глубокими примесными состояниями в запрещенной зоне [9–13]. В этих материалах обнаружено, что ограничение мощности достигается в результате самодефокусировки [10–13]. Так, в кристаллах ZnSe и GaAs с глубокими примесными уровнями самодефокусировка достигалась за счет примесного поглощения, приводящего к изменению концентрации электронов в зоне проводимости. Порог срабатывания таких ограничителей составлял 2–10 пДж, а динамический диапазон достигал 10^4 – 10^6 . В этих условиях реализовано ограничение нано- и микросекундных импульсов излучения ближнего инфракрасного диапазона (1–5 мкм) [11–13]. В видимом диапазоне исследований подобного рода мало [10]. Таким образом, сказанное свидетельствует о крайней актуальности разработки нелинейных материалов для низкопорогового ограничения мощности, в том числе работающих в видимой области.

В данной работе показывается принципиальная возможность использования в качестве низкопороговых ограничителей мощности нелиней-

ных сред на основе ионно-ковалентных кристаллов с адсорбированными металлорганическими структурами типа “молекула красителя–кластер металла”, обладающих сенсибилизированной антистоксовой люминесценцией (САСЛ) [14–22]. Возбуждение САСЛ является двухквантовым и происходит за счет нелинейного примесного поглощения света при низких потоках возбуждения, достигающих в определенных ситуациях 10^{-5} – 10^{-11} Вт/см² [14]. Явление САСЛ обнаружено и исследовано при низких температурах для микрокристаллов (МК) галогенидов серебра и фотоматериалов на их основе [14–22]. В последнее время показано, что аналогичное свечение может возникать при более высоких температурах (что очень важно с практической точки зрения) при облученности 10^{-3} – 10^{-4} Вт/см² в несветочувствительных системах – твердых растворах $Zn_xCd_{1-x}S$, содержащих на своей поверхности металлорганические наноструктуры [22]. Двухквантовые межзонные оптические переходы в таких нелинейных материалах, приводящие к возбуждению САСЛ, осуществляются через энергетические уровни адсорбированных металлорганических структур типа “молекула красителя–кластер металла”, компоненты которых слабо взаимодействуют друг с другом. Эти переходы происходят последовательно путем переноса энергии электронного возбуждения от молекул красителя к адсорбированному кластеру серебра и его дальнейшей фотоионизации [21]. Перечисленные факты дают основание для реализации в кристаллах с адсорбированными молекулами красителей и кластерами металла ограничения мощности при достижении уровня облученности, сопоставимого с возбуждающим САСЛ. Оно возможно за счет целого ряда процессов: обратного насыщения поглощения, самофокусировки и самодефокусировки и др. Обратное насыщение поглощения достигается при условии, что сечение перехода с уровня примесного центра в зону проводимости значительно превышает сечение для перехода из валентной зоны на уровень примесного центра [1]. Эффекты нелинейной рефракции могут возникать вследствие изменения показателя преломления среды с нелинейным поглощением за счет изменения заселенностей зоны проводимости и локальных уровней в запрещенной зоне [1, 23].

Методика эксперимента

В работах по исследованию САСЛ [14–22] использовались микрокристаллические порош-

ки и фотоэмulsionии, которые обладали высоким уровнем рассеяния света. Оптическая однородность, требуемая для проведения экспериментов по ограничению, в данной работе достигалась путем приготовления диспергированных в полимере нанокристаллов (НК) размером 40–70 нм с адсорбированными молекулами органических красителей и малоатомными кластерами металла. В этом случае вся система в целом должна обладать необходимыми нелинейно-оптическими свойствами, которые предварительно проверялись для образцов, выбираемых в качестве исследуемых объектов.

Основными объектами исследований были выбраны НК состава $AgCl_{0,95}I_{0,05}$ (далее просто $AgCl(I)$), диспергированные в желатиновой матрице, поскольку они сохраняли все свойства САСЛ, обнаруженные ранее для микрокристаллических образцов аналогичного состава [18–21]. Важным обстоятельством была возможность управления эффективностью возбуждения САСЛ путем низкотемпературного фотостимулированного формирования под действием ультрафиолетового (УФ) излучения поверхности кристаллов металлорганических структур типа “молекула красителя–кластер металла” [21]. Кроме того, синтезированы оптически однородные образцы НК $Zn_{0,6}Cd_{0,4}S$, содержащих на своей поверхности металлорганические структуры точно того же состава. Области примесного поглощения этих образцов и $AgCl(I)$ совпадают. Однако НК $Zn_{0,6}Cd_{0,4}S$ с адсорбированными металлорганическими структурами не обладали заметными сигналами САСЛ и поэтому использовались как образцы сравнения. Это позволяло установить роль двухквантовых процессов, определяющих САСЛ, в ограничении мощности.

Образцы синтезированы золь–гель методом. Нанокристаллы $AgCl(I)$ получали медленным (0,1 мл/с) двухструйным слиянием в 10% водный раствор желатины растворов $AgNO_3$ и KCl , KI в концентрациях, соответствующих окончательному составу, при интенсивном перемешивании. Синтез проводился в терmostатированном реакторе при температуре 50 °C. Уровень активности анионов $pCl = 2$ контролировался милливольтметром pH-673M. Технология получения НК $Zn_{0,6}Cd_{0,4}S$ была аналогичной.

По окончании синтеза в расплав желатины с НК вводились этанольные растворы красителей метиленового голубого (Кр1), соли 1,1'-диэтил-2,2'-хиноцианина 3,3'-ди-(γ -сульфопропил)-9 этил-4,5-бензо 4',5'-[4''5''-диметилено(2''3'')]-тиатиазолокарбоцианинбетаина (Кр2), малахи-

того зеленого (Кр3) в концентрациях 10^{-3} – 10^{-5} моль Кр/моль AgCl(I) (далее м.д.) После этого на стеклянных пластинках создавались слои толщиной 0,4–0,5 мм. Образцы были оптически однородными и имели уровень прозрачности около 15–20%. Техника получения спектров возбуждения САСЛ и используемая аппаратура описаны в работе [20].

Возбуждение САСЛ, регистрируемой в полосе собственного свечения AgCl(I) с $\lambda_{\text{max}} = 515$ нм, осуществлялось квантами в диапазоне 620–700 нм [18–20]. Он был выбран как область вероятного ограничения мощности. Поэтому далее в экспериментах по ограничению использовался лазерный модуль KLM-660/80 с длиной волны в максимуме излучения 660 нм и выходной мощностью в непрерывном режиме 80 мВт.

Для исследования нелинейно-оптических свойств полученных образцов использовалась стандартная методика Z-сканирования [23]. В этом случае измерялась зависимость нормированного пропускания образца, расположенного после собирающей линзы, от расстояния между фокальной плоскостью линзы и образцом [23]. Эта методика позволяет выяснить преимущественный механизм нелинейности. Так, при двухфотонном поглощении или обратном насыщении поглощения в образце Z-скан симметричен относительно фокальной плоскости. Если же в образце меняется показатель преломления и в нем возникает собирающая или рассеивающая динамическая линза, то кривая Z-сканирования несимметрична и имеет минимум перед фокальной плоскостью и максимум за ней, или наоборот, в зависимости от знака изменения показателя преломления [23].

Схема экспериментальной установки для Z-сканирования в варианте с закрытой апертурой представлена на рис. 1. Источником излучения 1 служил лазерный модуль KLM 660/80. С помощью вращающегося прерывателя 3 создавались импульсы длительностью до 1 мс и

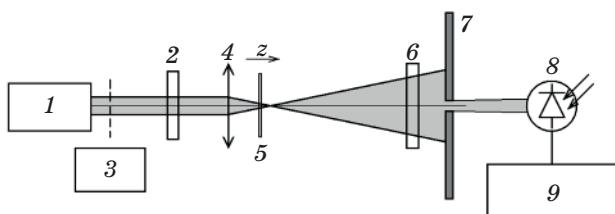


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследования эффекта ограничения мощности по методу Z-сканирования.

периодом в 40 мс. Свет, проходя через линзу 4 с фокусным расстоянием 15 см и кварцевое окно в вакуумном оптическом криостате, фокусировался на образец, закрепленный на охлаждаемом до 77 К держателе 5. Перетяжка лазерного пучка составляла в фокусе 22 мкм. Прошедшее через образец излучение попадало на светофильтр КС-10 6, с помощью которого ликвидировалась САСЛ в диапазоне 460–580 нм, которая могла вносить ошибку в измерение пропускания нелинейной среды. Далее, излучение при проходе через ограничивающую диафрагму 7 регистрировалось кремниевым фотодиодом ФД-7К 8, работающим в режиме измерения фототока. Диаметр отверстия диафрагмы составлял 3 мм. Следует отметить, что отдельно с помощью нейтральных фильтров проверялось, чтобы фототок, возникающий в фотодиоде, был линейно пропорционален интенсивности падающего на него излучения. Расстояние от фотодетектора до фокуса линзы составляло 50 см. Регистрация сигналов осуществлялась с помощью запоминающего осциллографа DC1102C – 9. Для ослабления интенсивности лазерного излучения использовались калибранные нейтральные светофильтры 2.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены спектры возбуждения САСЛ НК AgCl(I) с адсорбированными молекулами Кр1–Кр3 до (кривые 1, 3, 5) и после (кривые 2, 4, 6) экспонирования УФ в течение 20 с при 77 К.

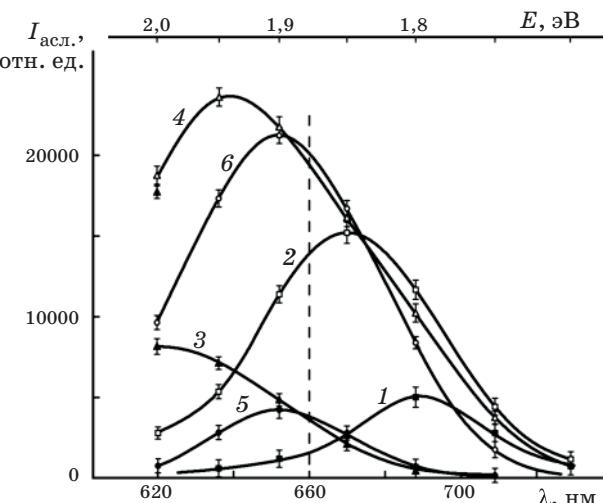


Рис. 2. Спектры возбуждения САСЛ диспергированных в желатине НК AgCl(I) с адсорбированными молекулами Кр1–Кр3. Неэкспонированные: 1 – Кр1 (10^{-5} м.д.), 3 – Кр2 (10^{-5} м.д.), 5 – Кр3 (5×10^{-3} м.д.) и экспонированные УФ в течение 20 с при 77 К: 2 – Кр1 (10^{-5} м.д.), 4 – Кр2 (10^{-5} м.д.), 6 – Кр3 (5×10^{-3} м.д.).

4, 6) их низкотемпературной (77 К) УФ засветки. Как и в случае микрокристаллов, антистоксова люминесценция, регистрируемая в полосе собственного свечения кристалла с $\lambda_{\max} = 515$ нм, возбуждалась в области 620–700 нм, совпадающей с областью поглощения молекул Кр1–Кр3 и фотоионизации адсорбированных малоатомных кластеров серебра (рис. 2). Следует отметить, что положения максимумов спектров возбуждения САСЛ для диспергированных в желатине НК AgCl(I) с адсорбированными молекулами Кр1–Кр3 отличались лишь на 15–30 нм от тех, что наблюдались для МК, что обусловлено влиянием желатиновой матрицы. Вместе с тем как и в случае МК [21], интенсивность САСЛ оптически однородных слоев после воздействия УФ излучения в течение 10–20 с при 77 К (рис. 2, кривые 2, 4, 6) значительно выше исходных, не подвергнутых этой засветке образцов (рис. 2, кривые 1, 3, 5). Как показано в работах [20, 21], это происходит вследствие низкотемпературного фотостимулированного процесса, в результате которого на поверхности кристаллов образуются металлоганические структуры, состоящие из молекул красителей и кластеров серебра. Возбуждение САСЛ с участием таких центров более эффективно в области между 635 нм и 680 нм (рис. 2). Поэтому при использовании источника с длиной волны 660 нм проявление нелинейно-оптических свойств образцов практически во всех случаях должно быть близко к максимальному (рис. 2, штриховая линия).

Характер нелинейностей, проявляющихся в образцах, обладающих САСЛ, установлен по методу Z-сканирования. На рис. 3 (кривые 1–3) приведены зависимости нормализованного пропускания образцов AgCl(I) с адсорбированными молекулами Кр1 в зависимости от положения образцов относительно фокальной плоскости линзы для импульсов длительностью 1 мс с различной плотностью падающего потока: 8×10^{16} квант/см²с (1), 3×10^{17} квант/см²с (2), 9×10^{17} квант/см²с (3). Из этих зависимостей видно, что в данном случае имеет место нелинейность, соответствующая положительному динамической линзе, или самофокусировке излучения. Причем с увеличением плотности падающего потока самофокусировка усиливалась. Для НК AgCl(I) с адсорбированными молекулами Кр2 и Кр3 Z-сканы имели полностью аналогичный вид и поэтому в работе не приводятся. В то же время для НК Zn_{0,6}Cd_{0,4}S с адсорбированными металлоганическими структурами, не обладающими заметными сигналами САСЛ, нелинейности

при импульсном (1 мс) действии излучения не проявлялись.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что самофокусировка излучения в НК AgCl(I) с адсорбированными металлоганическими структурами обусловлена двухквантовыми процессами, происходящими в кристаллах с участием энергетических состояний адсорбированных молекул красителей и кластеров серебра. Возникновение под действием света тепловой линзы в таком образце должно приводить к самодефокусировке, поскольку температурные коэффициенты изменения показателя преломления (dn/dT) в данной спектральной области для хлористого серебра и желатины отрицательны [25–27]. Другими словами, характер нелинейности при тепловом изменении показателя преломления образца должен соответствовать возникновению отрицательной динамической линзы. При прохождении через слой НК AgCl(I) и Zn_{0,6}Cd_{0,4}S с адсорбированными металлоганическими структурами импульсного излучения в условиях низких температур тепловые процессы незначительны. Но при переходе от импульсного излучения к непрерывному эффект тепловой линзы начинает преобладать (рис. 3, кр. 4, 5). В этом случае Z-сканы соответствовали самодефокусировке.

Полученные данные о проявлении нелинейно-оптических свойств диспергированными в желатине НК AgCl(I) с адсорбированными металлоганическими структурами при плотностях

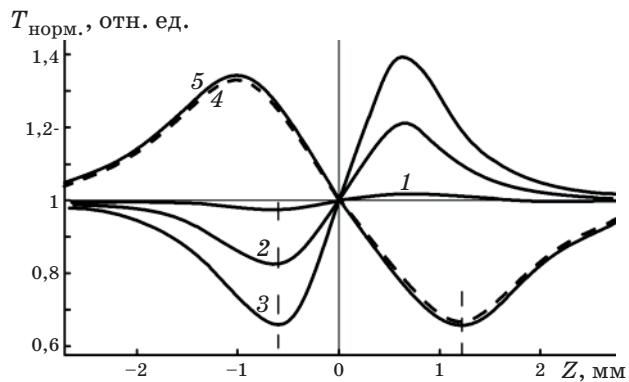


Рис. 3. Z-сканы для слоев диспергированных в желатине НК AgCl(I) с адсорбированными молекулами Кр1 УФ, экспонированных в течение 20 с при 77 К при плотностях падающего потока: 8×10^{16} квант/см²с – 1, 3×10^{17} квант/см²с – 2, 9×10^{17} квант/см²с – 3, 9×10^{17} квант/см²с для желатиновой матрицы с молекулами Кр1 (300 К) – 4, для НК Zn_{0,6}Cd_{0,4}S с адсорбированными молекулами Кр1 (300 К) – 5.

мощности $(3-9) \times 10^{17}$ квант/см² с позволили показать существование эффекта ограничения на этих плотностях. Для этого образцы устанавливались до фокуса линзы 4 (рис. 1) на расстоянии 0,6 см (на рис. 3 это место указано штриховой линией) и определялись зависимости интенсивности прошедшего света от интенсивности падающего (рис. 4). Зависимости, представленные на этом рисунке, демонстрируют существование эффекта ограничения мощности, начиная с излучения в плоскости линзы 4 плотностью $(4-7) \times 10^{17}$ квант/см² с при воздействии импульсов длительностью 1 мс. Кривые ограничения 1 и 2 на рис. 4а соответствуют образцам, обладающим САСЛ, спектры возбуждения которой

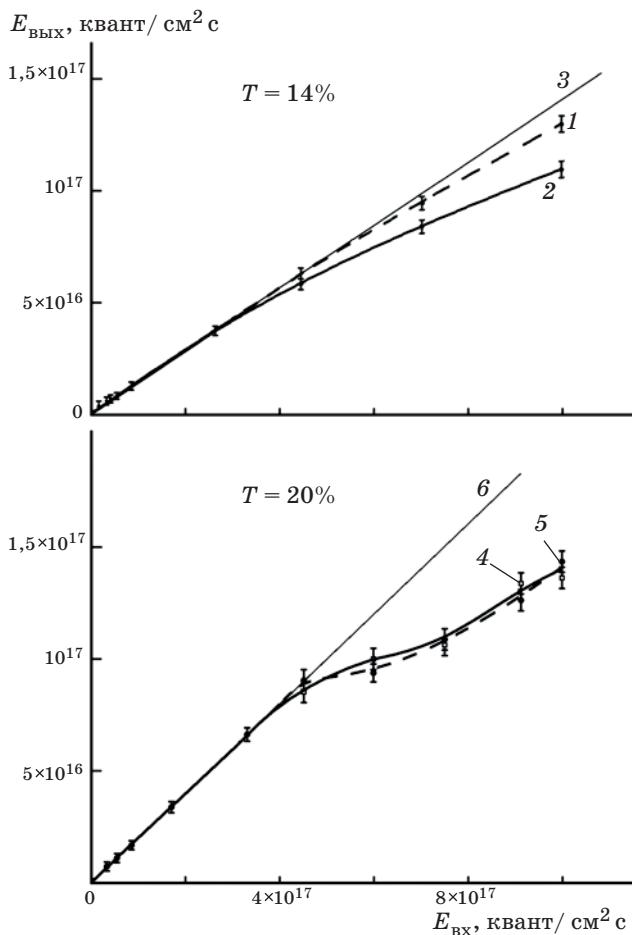


Рис. 4. Кривые ограничения мощности оптического излучения для диспергированных в желатине НК AgCl(I) с адсорбированными молекулами Кр3. 1 – до и 2 – после УФ экспонирования (77 К) в течение 20 с, 3 – уровень линейного пропускания образца; с адсорбированными молекулами Кр1 – 4 и Кр2 – 5, подвергнутых УФ экспонированию (77 К) в течение 20 с, 6 – уровень линейного пропускания образцов.

представлены на рис. 2 кривыми 5 и 6. Кривые 4 и 5 на рис. 4б соответствуют кривым 2 и 4 рис. 2. Они представляют собой типичные кривые ограничения мощности излучения с резким порогом и последующим линейным ростом [12]. Следует отметить усиление эффекта ограничения после облучения образцов ультрафиолетом (на рис. 4, 2 проходит ниже 1).

Важной особенностью эффекта является то, что загиб кривой ограничения при максимальных из использованных плотностей потоков тем сильнее, чем интенсивнее САСЛ в исследуемых образцах. Так, в НК AgCl(I) с адсорбированными молекулами Кр3, для которых интегральная интенсивность САСЛ на порядок ниже образцов, подвергнутых УФ засветке, имеет место незначительное ограничение мощности (ср. рис. 2, кривая 5 и рис. 4, кривая 1) В то же время загиб кривой ограничения существенно увеличивается в результате протекания низкотемпературного фотостимулированного процесса в НК AgCl(I) (рис. 4, кривые 2, 4, 5). В этом случае эффективность двухквантовых оптических межзонных переходов повышается (рис. 2, кривые 2, 4, 6). Синхронность в увеличении эффекта ограничения мощности и в изменении вероятностей оптических переходов, обуславливающих возникновение САСЛ, в результате инициации в образце низкотемпературного фотостимулированного формирования кластеров серебра и металлогорганических структур на их основе [21] свидетельствует о единой природе центров, приводящих к указанным эффектам.

Обнаруженные самофокусировка и низкоНПОГОВОЕ ограничение мощности в образцах, обладающих САСЛ, по-видимому, обусловлены эффектом “заполнения зон” [23, 28]. Воздействие излучения на образец вызывает двухступенчатые переходы, осуществляющиеся посредством возбуждения молекул красителя с последующей передачей возбужденного состояния примесному уровню кристалла вблизи середины его запрещенной зоны и перевода электрона с этого уровня в зону проводимости [21]. А образовавшиеся в результате этого процесса электроны и дырки перераспределяются по локальным уровням кристалла различной глубины и природы. Это приводит к изменению коэффициента поглощения $\Delta\alpha(\omega, I)$, и, следовательно, показателя преломления $\Delta n(\omega, I)$. При этом тот факт, что межзонный переход происходит не через виртуальные уровни, а с участием реальных состояний, обуславливает возможность существования низких порогов ограничения. Следует отметить,

что обнаруженные в эксперименте зависимости нельзя связать с образованием свободных носителей зарядов в зоне проводимости, так как в этом случае имело бы место появление отрицательной динамической линзы [23]. Это определяется тем, что при реализации САСЛ концентрация свободных электронов очень незначительна, так как в этом случае существует большая вероятность их рекомбинации с дырками на центрах свечения.

Заключение

Обнаруженный на примере НК AgCl(I) с адсорбированными металлогорганическими структурами эффект низкопорогового ограничения мощности за счет самофокусировки свидетельствует о принципиальной возможности его реализации в ионно-ковалентных кристаллах, обладающих сенсибилизированной антистоксовой люминесценцией. Нелинейность связывается с перераспределением по локальным уровням образующихся в результате двухступенчатого перехода электронов и дырок в кристалле. В то же время не подтверждается возможность возникновения эффекта ограничения мощности в этом случае за счет обратного насыщения поглощения в многоуровневых системах. Этот факт имеет важное значение, поскольку косвенно подтверждает модель механизма возникновения двухквантовых межзонных оптических переходов и сенсибилизированной антистоксовой люминесценции в ионно-ковалентных кристаллах с адсорбированными металлогорганическими структурами. В этой модели представляется, что первым квантам возбуждается молекула красителя, перенос энергии электронного возбуждения от которой кластеру серебра стимулирует переход “валентная зона – локальный уровень адсорбированного кластера”. А вторым квантам осуществляется фотоионизация кластера металла, имеющего меньшее значение эффективного сечения перехода, по сравнению с аналогичной величиной для красителя. Такое соотношение эффективных сечений не может дать эффективного обратного насыщения поглощения и ограничения мощности [1].

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 06-02-96312-р-цпр_a).

ЛИТЕРАТУРА

- Tutt L.W., Boggess T.F. A review of optical limiting mechanisms and devices using organics, fullerenes, semiconductors and other materials // Prog. in Quant. Electr. 1993. V. 17. № 4. P. 299–338.
- Miles P.A. Bottleneck optical limiters: the optimal use of excited-state absorbers // Appl. Opt. 1994. V. 33. № 30. P. 6965–6979.
- Perry J.W., Mansour K., Lee I.-Y.S., Wu X.-L., Bedworth P.V., Chen C.-T., Marder D.Ng, Miles P., Wada T., Tian M., Sasabe H. Organic optical limiter with a strong nonlinear absorptive response // Science. 1996. V. 273. № 5281. P. 1533–1536.
- Kovsh D.I., Yang S., Hagan D.J., Van Stryland E.W. Nonlinear optical beam propagation for optical limiting // Appl. Opt. 1999. V. 38. № 24. P. 5168–5180.
- Nevezina-Sturhan A., Werhahn O., Siegner U. Low-threshold high-dynamic-range optical limiter for ultra-short laser pulses // Appl. Phys. B. 2002. V. 74. № 6. P. 553–557.
- Sun Y.-P., Riggs J.E. Organic and inorganic optical limiting materials. From fullerenes to nanoparticles // Int. Rev. Phys. Chem. 1999. V. 18. № 1. P. 43–90.
- Zhang L., Wang L. Recent research progress on optical limiting property of materials based on phtalocyanine, its derivatives and carbon nanotubes // J. Mater. Sci. 2008. V. 43. № 17. P. 5692–5701.
- Ганеев Р.А., Усманов Т.Б. Нелинейно-оптические характеристики различных сред // Квант. электрон. 2007. Т. 37. В. С. 605–622.
- Smirl A.L., Boggess T.F., Dubard J., Gui A.G. Single and multiple beam nonlinear absorption and refraction measurements in semiconductors // Proc. SPIE. 1990. V. 1307. P. 251–261.
- Михеева О.П., Сидоров А.И. Ограничение излучения с длиной волны 0,65 мкм в примесном селениде цинка // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 12. С. 115–116.
- Михеева О.П., Сидоров А.И., Хайкина А.С., Чугаевец Е.В. Особенности оптического ограничения импульсно-периодического лазерного излучения в примесном GaAs и ZnSe // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 2. С. 21–24.
- Сидоров А.И. Механизм низкопорогового ограничения излучения в компенсированном арсениде галлия // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 1. С. 7–10.
- Багров И.В., Жевлаков А.П., Сидоров А.И. Ограничение лазерных импульсов нано- и микросекундной длительности в компенсированном арсениде галлия // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 10. С. 25–30.
- Овсянкин В.В. Феофилов П.П. Кооперативная сенсибилизация люминесценции галоидсеребряных солей и спектральная сенсибилизация фотографических эмульсий // Докл. АН СССР. 1967. Т. 174. № 24. С. 787–789.
- Hediger H., Junod P., Steiger R. Dye sensitized photoluminescence in silver halides // J. Luminesc. 1981. V. 24/25. Part 2. P. 881–884.

16. Белоус В.М., Ахмеров А.Ю., Жуков С.А., Свиридова О.И. Люминесцентные исследования электронно-дырочных процессов в галогенидо-серебрянных микрокристаллах с адсорбированными молекулами красителей // ЖНиПФиК. 1998. Т. 43. № 6. С. 3–11.
17. Клюев В.Г., Кушнир М.А., Латышев А.Н. Фотохимическая сенсибилизация антистоксовой люминесценции бромоидосеребряных эмульсий // ЖНиПФиК. 2001. Т. 46. № 5. С. 49–53.
18. Ефимова М.А., Клюев В.Г., Овчинников О.В. Антистоксова люминесценция твердых растворов $\text{AgCl}(\text{I})$, сенсибилизированная продуктами низкотемпературного фотохимического процесса // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. Физика, математика. 2003. № 2. С. 25–29.
19. Овчинников О.В., Воробьева Р.П., Евлев А.Б., Квашнина Н.В., Латышев А.Н., Утехин А.Н., Черных С.В., Смирнов М.С. Антистоксова люминесценция микрокристаллов твердых растворов $\text{AgCl}_{0,95}\text{I}_{0,05}$ с адсорбированными молекулами органических красителей // ЖПС. 2006. Т. 73. № 5. С. 592–596.
20. Иевлев В.М., Латышев А.Н., Овчинников О.В., Смирнов М.С., Холкина А.М., Утехин А.Н., Евлев А.Б. Фотостимулированное формирование центров антистоксовой люминесценции в ионноковалентных кристаллах // Докл. АН. 2006. Т. 409. № 6. С. 756–758.
21. Овчинников О.В., Смирнов М.С., Латышев А.Н., Стаселько Д.И. Фотостимулированное формирование сенсибилизированной антистоксовой люминесценции в микрокристаллах $\text{AgCl}(\text{I})$ // Опт. и спектр. 2007. Т. 103. № 3. С. 497–504.
22. Овчинников О.В., Косякова Е.А., Смирнов М.С., Евлев А.Б., Клюев В.Г., Латышев А.Н., Утехин А.Н. Антистоксова люминесценция твердых растворов $\text{Zn}_{0,6}\text{Cd}_{0,4}\text{S}$ с адсорбированными молекулами органических красителей и малоатомными кластерами серебра // ЖПС. 2007. Т. 74. № 5. С. 617–620.
23. Sutherland R.L. Handbook of nonlinear optics. N.Y.: Marcel Dekker Inc., 1996. 685 p.
24. Сухоруков А.П. Дифракция световых пучков в нелинейных средах // Соровский образовательный журнал. 1996. № 5. С.85–92.
25. Tsay Y.-f., Bendow B., Mitra S.S. Theory of the temperature derivative of the refractive index in transparent crystals // Phys. Rev. B. 1973. V. 8. № 6. P. 2688–2696.
26. Die Grundlagen der photographischen Prozesse mit Silberhalogeniden / Herausgegeben von Frieser H., Haase G., Klein E. Frankfurt an Main, 1968. B. 1–3. 1480 s.
27. Sanchez-de-la-Llave D., Iturbe Gastilo M.D., Ramos Garcia R. Slow nonlinearities in bleached photographic film // Proc. SPIE. 2003. V. 4797. P. 110–119.
28. Sheik-Bahae M., Hagan D.J., Van-Stryland E.W. Dispersion and band-Gap scaling of the electronic Kerr effect in solids associated with two-photon absorption // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 65. № 1. P. 96–99.