

Нелинейно-оптические свойства гетерогенных жидких нанофазных композитов на основе широкозонных наночастиц Al_2O_3

Ю.Н.Кульчин, А.В.Щербаков, В.П.Дзюба, С.С.Вознесенский, Г.Т.Микаэлян

Представлены результаты экспериментального исследования нелинейно-оптических свойств и их зависимости от материала матрицы гетерогенных жидких нанофазных композитов на основе широкозонных наночастиц из Al_2O_3 . Проанализированы факторы, определяющие нелинейно-оптические свойства исследуемых композитов и обнаруженную сильную зависимость их оптических свойств от материала матрицы. Предложены физические механизмы, способные объяснить полученные результаты.

Ключевые слова: наночастицы, гетерогенные жидкие композиты, широкозонный полупроводник, лазерное излучение, низкороговый нелинейный отклик.

1. Введение

Исследования последних лет продемонстрировали перспективность использования наноразмерных структур в различных областях науки и техники. Широкий интерес к их изучению обусловлен, в том числе, отличием фундаментальных оптических свойств этих структур от свойств объемных материалов из-за эффектов пространственного квантования [1 – 3]. В связи с этим перспективы развития оптоэлектроники стимулируют поиск и исследование новых наноматериалов, способных придать новое качество системам лазерной физики, оптической связи и оптической обработки информации. Гетерогенные нанофазные композиты на основе наночастиц полупроводниковых и диэлектрических материалов представляют значительный интерес для создания устройств управления излучением в оптических информационных системах.

Нанофазные композиты – это гетерогенные среды, в которых, в отличие от гомогенных сред, нелинейно-оптический отклик возникает за счет как индуцированных светом изменений показателей преломления и поглощения, так и индуцированного светом светорассеяния частиц [4]. Важным достоинством гетерогенных сред является возможность варьирования их линейных и нелинейных оптических свойств посредством выбора их компонентов, а также подбора концентрации, размера и формы наночастиц. Особое значение имеет выбор материала матрицы гетерогенного композита, в которой размещаются наночастицы, поскольку характеристики материала способны значительно влиять на электронные свой-

ства наночастиц [1, 4, 5]. В связи с этим особого внимания заслуживают высокотехнологичные гетерогенные нанофазные композиты, представляющие собой жидкие нанофазные композиты на основе оптически прозрачного материала с равномерно распределенными по объему наночастицами широкозонных полупроводников или диэлектриков. Как показано в [4], при воздействии наносекундных световых импульсов видимого и ближнего ИК диапазонов на такого рода среды в них возникает низкороговый (плотность энергии импульсов не более 0.5 нДж/см²) нелинейно-оптический отклик, выражающийся как в ограничении мощности проходящего излучения, так и в просветлении среды. Характер оптического отклика в этих средах напрямую связан с величиной показателя преломления и шириной запрещенной зоны материала используемых наночастиц. В работе [6] показано, что аналогичные эффекты имеют место и при использовании непрерывного излучения. В обоих случаях модуляция оптических свойств жидкофазной гетерогенной среды может происходить в результате комбинации следующих процессов: изменения поглощения, светорассеяния и температурной модуляции показателя преломления. Порог интенсивности излучения, при котором возникает нелинейно-оптический отклик, должен зависеть от материала наночастиц и от материала матрицы гетерогенной среды, что представляет значительный научный и практический интерес. Это определило цель настоящей работы – исследование влияния материала матрицы на нелинейно-оптические свойства гетерогенных жидких нанофазных композитов на основе широкозонных наночастиц Al_2O_3 .

2. Экспериментальная установка и объект исследования

Для изучения влияния оптических характеристик жидкофазной матрицы на нелинейно-оптические свойства гетерогенных жидкофазных композитов с наночастицами (ГЖКН) была использована экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1. Источником непрерывного излучения служил He–Ne-лазер

Ю.Н.Кульчин, А.В.Щербаков, В.П.Дзюба, С.С.Вознесенский. Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: kulchin@iacp.dvo.ru, alexwork79@list.ru, vdzyuba@iacp.dvo.ru, vss@iacp.dvo.ru; Г.Т.Микаэлян. ОАО Научно-производственное предприятие «Инжект», Россия, 410052 Саратов, просп. 50 лет Октября, 101; e-mail: inject@overta.ru

Поступила в редакцию 24 января 2007 г., после доработки – 28 мая 2007 г.

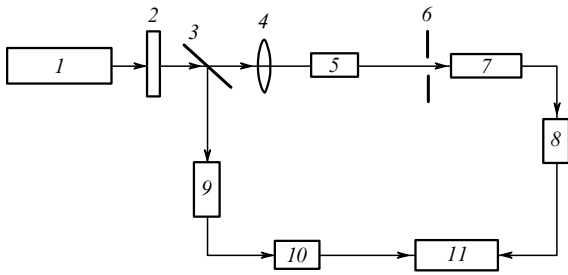


Рис.1. Схема экспериментальной установки:
 1 – лазер; 2 – набор сменных нейтральных светофильтров; 3 – светоделитель; 4 – линза; 5 – кювета с исследуемым ГЖКН; 6 – точечная диафрагма; 7, 9 – фотоприемники; 8, 10 – АЦП; 11 – персональный компьютер.

($\lambda = 633$ м) со средней мощностью 50 мВт либо непрерывный Nd:YAG-лазер (вторая гармоника излучения, $\lambda = 532$ нм) с диодной накачкой (средняя мощность лазера 40 мВт). Мощность излучения регулировалась набором нейтральных светофильтров 2. Для контроля уровня мощности излучения часть пучка отщеплялась светоделителем 3 и регистрировалась фотоприемником 9, сигнал которого оцифровывался АЦП 10 и направлялся в персональный компьютер 11. Длиннофокусная линза 4 ($F = 30$ см) использовалась для фокусировки светового пучка в наполненную исследуемым ГЖКН кювету 5 из оптического стекла с плоскопараллельными стенками, длина кюветы в направлении распространения пучка составляла 20 мм, а толщина стенок – 160 мкм. Далее из светового пучка точечной диафрагмой, установленной на оси (диаметр отверстия 1 мм), выделялась центральная область и излучение попадало на регистрирующий фотоприемник 7. Электрический сигнал с фотоприемника оцифровывался АЦП 8, поступал на вход персонального компьютера 11 и обрабатывался.

В качестве прозрачных жидкофазных матриц ГЖКН использовались вакуумное масло ВМ-4 (показатель преломления $n \sim 1.4$) и иммерсионное масло на основе кедрового бальзама ($n \sim 1.5$), обладающие линейными и нелинейными оптическими характеристиками в видимом и ИК диапазонах спектра соответственно. Наполнителем в ГЖКН служили наночастицы широкозонного диэлектрика Al_2O_3 ($n \sim 1.7$). Наночастицы определенного размера выделялись из нанопорошков методом «отмучивания» в ацетоне [7]. Объемная концентрация наночастиц в ГЖКН варьировалась от 0.03 % до 0.3 %.

На рис.2 приведено изображение одной из наночастиц Al_2O_3 , осажденных из взвеси в ацетоне на полированную пластину из кремния, полученное с помощью сканирующего атомного силового микроскопа NT MDT Solver P46. Максимальный поперечный размер наночастиц находился в диапазоне 40–50 нм. Поверхность наночастиц Al_2O_3 не является гладкой (рис.2), а сами они имеют сложную многовершинную пирамидальную форму. Сложная форма наночастиц, а также наличие диэлектрической матрицы в их окружении обуславливают изменение электронной энергетической структуры основного вещества Al_2O_3 .

На рис.3 приведен экспериментально полученный спектр пропускания ансамбля наночастиц Al_2O_3 , измеренный на спектрофотометре Hitachi U2010. Из данной зависимости следует, что запрещенная зона E_g для наночастиц Al_2O_3 составляет ~ 3.7 эВ, что находится в хорошем согласии с данными работы [4]. В то же время из

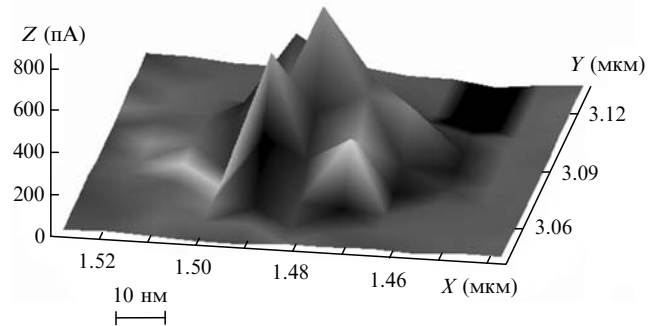


Рис.2. Изображение наночастицы Al_2O_3 , полученное с использованием сканирующего атомного силового микроскопа.

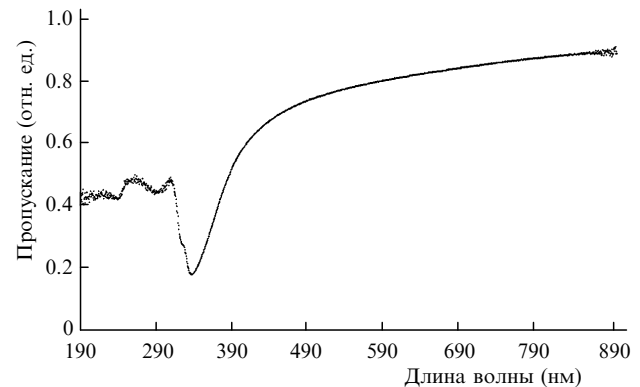


Рис.3. Экспериментальная зависимость спектра пропускания ансамбля наночастиц Al_2O_3 от длины волны излучения.

рис.3 видно, что имеет место значительное размывание границы запрещенной зоны, которое обусловлено изменением электронной структуры вещества, квантоворазмерными состояниями экситонов и зависимостью [3] сечений поглощения ($\sigma_a \sim \omega^2$) и рассеяния ($\sigma_s \sim \omega^4$) излучения наночастицами от частоты ω излучения.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В результате взаимодействия проходящего через ГЖКН излучения с комплексом наночастицы – жидкофазная матрица наблюдаются изменения показателя преломления и коэффициентов рассеяния и поглощения композитной среды, зависящие от интенсивности излучения, параметров материала матрицы, характеристик материала, от размера и концентрации наночастиц. Учитывая возникающую нелинейность оптических характеристик, показатель преломления ГЖКН n можно описать в приближении эффективного показателя преломления:

$$n(I, r, \alpha, z) = n_0 + n_1 I(r, z, \alpha) + \beta n_2(T) I(r, z, \alpha), \quad (1)$$

где $I(r, z, \alpha)$ – интенсивность световой волны в среде; n_0 – исходный показатель преломления среды; n_1 – добавка к n_0 , обусловленная присутствием наночастиц, которая зависит от частоты и напряженности электрического поля; $n_2(T)$ – температурная добавка к показателю преломления среды, обусловленная матрицей композитной среды; β – коэффициент пропорциональности; α – коэффициент ослабления света ГЖКН, зависящий от концентрации наночастиц; r – радиальная координата по сечению светового пучка; T – температура среды; z – координата в направлении распространения световой волны в кювете. Поскольку распределение интенсивности излу-

ния $I(r, z, \alpha)$ по сечению лазерного пучка имеет гауссов профиль, то распределение показателя преломления ГЖКН в поле лазерной волны будет неоднородным и зависящим от величин и знаков коэффициентов n_1 и $n_2(T)$, определяющих соответствующий вклад в нелинейно-оптический эффект как самих наночастиц, так и материала матрицы. В зависимости от знака n_1 показатель преломления ГЖКН либо увеличивается вблизи оси пучка и спадает к периферии, и тогда формируется положительная градиентная цилиндрическая линза, либо наоборот, уменьшается от периферии к центру пучка, и тогда происходит формирование отрицательной градиентной цилиндрической линзы [8, 9].

Распространение света в ГЖКН сопряжено с поглощением части его мощности наночастицами и молекулами материала матрицы. В результате вдоль траектории распространения светового пучка происходит выделение тепла в жидкофазную матрицу. Количество выделившегося тепла зависит от коэффициента α , концентрации наночастиц, эффективности передачи тепла от наночастиц к молекулам матрицы, а также от интенсивности пучка. Выделившееся тепло изменяет температуру среды, а следовательно, показатель преломления вдоль распространения пучка. Знак производной dn/dT совпадает со знаком коэффициента n_2 в (1), что в совокупности с гауссовым профилем $I(r, z, \alpha)$ определяет тип температурной градиентной цилиндрической линзы (положительная или отрицательная), формирующейся в ГЖКН [10].

Еще одним фактором, влияющим на распространение светового пучка в ГЖКН, является рассеяние света на наночастицах. Как показано в [4], если показатель преломления наночастиц больше показателя преломления матрицы, то зависимость сечения рассеяния излучения от интенсивности излучения является степенной (с последующим насыщением), что приводит к ослаблению интенсивности в приосевой части светового пучка. Таким образом, в зависимости от величины и знаков второго и третьего слагаемых в (1), значений коэффициентов поглощения, характеристик материала и концентрации наночастиц, с ростом интенсивности проходящего через кювету с ГЖКН излучения должна изменяться интенсивность излучения на оси светового пучка вследствие его фокусировки (дефокусировки) и рассеяния.

Для выявления влияния наночастиц на нелинейную добавку показателя преломления в ГЖКН в качестве жидкофазной матрицы использовалось вакуумное масло ВМ-4, для которого, согласно техническим условиям, $|dn/dT| < 10^{-5}$ град $^{-1}$. На рис.4 приведены экспериментальные зависимости, нормированные на максимум интенсивности I_0 прошедшего через ГЖКН излучения (I_{out}/I_0), от интенсивности излучения на входе в кювету I_{in} , полученные для длин волн $\lambda = 633$ и 532 нм. Объемная концентрация наночастиц Al_2O_3 в ГЖКН составляла 0.3%.

Видно, что, начиная с интенсивности ~ 160 мВт/мм 2 , полученные зависимости становятся нелинейными. При этом для излучения с $\lambda = 532$ нм имеет место ограничение прошедшего излучения, а для излучения с $\lambda = 633$ нм, наоборот, наблюдается «просветление» пропускания.

При использовании в качестве жидкофазной матрицы иммерсионного масла на основе кедрового бальзама, для которого $dn/dT \approx -3 \times 10^{-3}$ град $^{-1}$ [11], дополнительно включается температурный механизм изменения показателя преломления. На рис.5 приведены экспери-

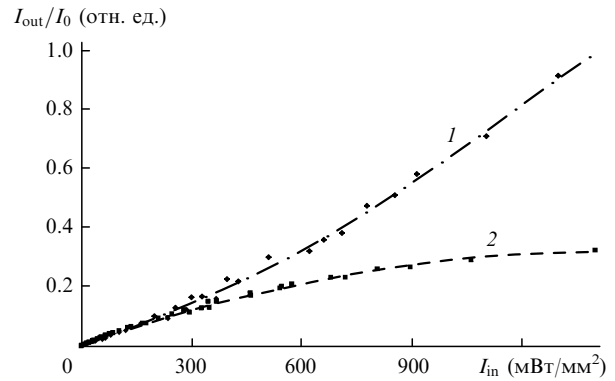


Рис.4. Зависимости интенсивности излучения, прошедшего через ГЖКН на основе масла ВМ-4, от интенсивности падающего излучения для $\lambda = 633$ нм (1) и 532 нм (2) при $I_0 = 1400$ мВт/мм 2 .

ментальные нормированные зависимости $I_{out}/I_0 = f(I_{in})$, полученные как для чистого иммерсионного масла ($\lambda = 633$ нм), так и для ГЖКН с объемной концентрацией наночастиц 0.3 % ($\lambda = 633$ и 532 нм). Видно, что, в отличие от ранее рассмотренного случая (рис.4), для данного нанокompозита нелинейность пропускания проявляется уже при интенсивностях ~ 40 мВт/мм 2 . Другой отличительной особенностью является то обстоятельство, что на начальном участке роста I_{in} (до $300 - 350$ мВт/мм 2) для обеих длин волн сохраняется аналогичный представленному на рис.4 ход зависимостей. Однако при дальнейшем увеличении интенсивности I_{in} ($\lambda = 633$ нм) возникают осцилляции пропускания ГЖКН, а для излучения с $\lambda = 532$ нм после достижения порога ограничения наблюдается значительное уменьшение пропускания ГЖКН. Таким образом, даже столь незначительная добавка наночастиц к объему матрицы (~ 0.3 %) способна значительно изменить оптические характеристики среды. В частности порог ограничения интенсивности излучения для ГЖКН снижается более чем в 6 раз.

Как показывают результаты исследований, осцилляции пропускания ГЖКН обусловлены самофокусировкой и дифракционным размыванием излучения по сечению прошедшего через ГЖКН пучка света с длиной волны $\lambda = 633$ нм, что видно из приведенных на рис.6 фотографий. Влияние материала матрицы на оптические свойства ГЖКН иллюстрирует табл. 1.

Объяснить поведение полученных зависимостей можно следующим образом. Как отмечалось выше, наноча-

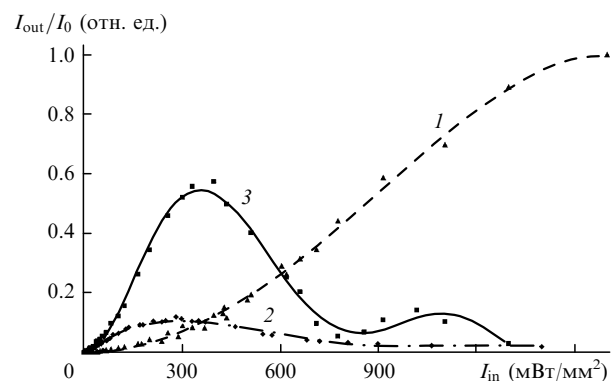


Рис.5. Зависимости интенсивности излучения, прошедшего через чистое иммерсионное масло при $\lambda = 633$ нм (1), и взвеси ГЖКН на основе иммерсионного масла при $\lambda = 532$ нм (2) и 633 нм (3), от интенсивности падающего излучения; $I_0 = 1600$ мВт/мм 2 .

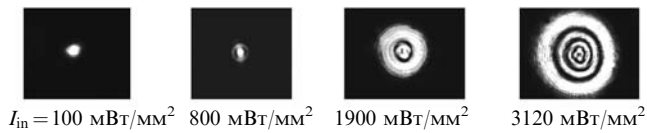


Рис. 6. Распределение интенсивности излучения в дальней зоне по сечению светового пучка после его прохождения через ГЖКН на основе иммерсионного масла при различных значениях интенсивности I_{in} и объемной концентрации наночастиц Al_2O_3 , равной 0.03 %.

стицы Al_2O_3 в диэлектрической матрице имеют широкую полосу поглощения в видимой и ближней ИК областях спектра (см. рис.3). Это указывает на наличие в запрещенной зоне материала наночастиц глубоких энергетических уровней, что, по-видимому, обусловлено двумя причинами. Во-первых, наличие значительного числа дефектов кристаллической структуры наночастиц, сконцентрированных вблизи поверхности, приводит к образованию внутри запрещенной зоны дополнительных энергетических зон [4]. В частности, приведенные выше экспериментальные результаты свидетельствуют об образовании внутри запрещенной зоны, на глубине $E_d \sim 2.3$ эВ от дна зоны проводимости, дополнительной «примесной» зоны донорного типа шириной 0.3–0.4 эВ.

Табл. 1. Влияние материала матрицы на оптические свойства ГЖКН.

Материал матрицы	Наблюдаемые явления	
	$\lambda = 532$ нм	$\lambda = 633$ нм
Иммерсионное масло ($n = 1.5$, $dn/dT \approx -3 \times 10^{-3}$ град $^{-1}$)	Расфокусировка	Осцилляции пропускания; дифракционное размытие пучка света
Вакуумное масло ($n = 1.4$, $ dn/dT < 10^{-5}$ град $^{-1}$)	Расфокусировка	Самофокусировка

Во-вторых, сложная многовершинная форма наночастиц обуславливает в пределах одной наночастицы значительный (от нуля до 20 нм) разброс геометрических размеров отдельных выступов. В результате этого существенную роль начинает играть эффект пространственно-размерного квантования энергии носителей заряда. Оценочные расчеты, в которых энергия наночастицы моделировалась бесконечно глубокой потенциальной ямой, имеющей форму параболоида вращения, показывают наличие вблизи дна зоны проводимости наночастицы широкого спектра уровней энергии носителей заряда, занимающих область ~ 1 эВ в глубь от дна зоны проводимости. Таким образом, в запрещенной зоне материала наночастиц Al_2O_3 находится множество дополнительных (аналогичных примесным) энергетических уровней и зон с ограниченным числом занятых и разрешенных состояний, что приводит к значительному поглощению излучения в указанных областях длин волн и обуславливает экспериментально наблюдаемое значительное размытие края поглощения (см. рис.3). Принципиальным условием реализации этого явления является наличие у материала наночастицы широкой запрещенной зоны.

Из вышесказанного следует, что при освещении входящих в комплекс ГЖКН наночастиц Al_2O_3 излучением с длинами волн 532 и 633 нм энергии квантов света оказывается недостаточно для перевода электронов из валентной зоны в зону проводимости ($E_{532} = 2.34$ эВ и $E_{633} = 1.97$ эВ, а $E_g = 3.7$ эВ). Поэтому кванты света взаимодействуют с электронами, находящимися в «примесной»

зоне (на глубине E_d), и в этом случае энергии квантов с длиной волны излучения 532 нм уже достаточно для перевода электронов в зону проводимости ($E_{532} > E_d$). В результате увеличивается концентрация неравновесных носителей заряда в зоне проводимости и появляется нелинейная добавка к показателю преломления и коэффициенту поглощения вещества, которая согласно [12] должна быть отрицательной. Таким образом, для излучения с длиной волны 532 нм коэффициент n_1 в уравнении (1) имеет отрицательный знак, что в отсутствие влияния температуры на показатель преломления среды приводит к формированию в ГЖКН отрицательной градиентной линзы, т. е. к уменьшению (ограничению) интенсивности на оси светового пучка вследствие его расфокусировки, которое наблюдается с ростом интенсивности световой волны на входе. Этот факт объясняет ход зависимости 2 на рис.4, причем насыщение ограничения с ростом интенсивности световой волны связано с конечностью числа электронов в «примесной» энергетической зоне и с дополнительным поглощением излучения.

Для излучения с длиной волны $\lambda = 633$ нм энергии кванта света оказывается недостаточно для перевода электронов из «примесной» зоны в зону проводимости ($E_{633} < E_d$), но вполне достаточно для возбуждения в наночастице переходов носителей заряда с «примесной» зоны на уровни энергии носителей заряда, расположенные вблизи дна зоны проводимости. В результате происходит возбуждение дипольного перехода, индуцирующего дипольный момент, величина которого, согласно [3], пропорциональна размерам наночастицы и может в десятки раз превышать типичные для объемной среды значения. Таким образом, в поле световой волны происходит поляризация наночастиц, что создает дополнительную поляризацию гетерогенной среды и, как результат, нелинейную добавку к ее показателю преломления. В области частот, меньших резонансной, эта добавка должна быть положительной [13–15], поэтому для излучения с длиной волны 633 нм коэффициент n_1 в уравнении (1) также положителен. В результате в отсутствие влияния температуры на показатель преломления среды с ростом интенсивности I_{in} должна формироваться положительная градиентная линза. В свою очередь при достаточно большой длине взаимодействия световой волны с ГЖКН увеличение показателя преломления за счет самофокусировки пучка может привести к образованию волноводного канала в направлении z и к дополнительной концентрации излучения в приосевой области. В итоге с ростом интенсивности излучения будет наблюдаться «просветление» ГЖКН (кривая 1 на рис.4). Ограничение «просветления» ГЖКН для излучения с $\lambda = 633$ нм произойдет при достижении насыщения слагаемого $n_1 I(r, \alpha, z)$ в (1), что обусловлено насыщением «примесного» поглощения вследствие малой концентрации «примесных» центров. В результате уменьшится интенсивность излучения в приосевой области.

При использовании в качестве матрицы ГЖКН иммерсионного масла на основе кедрового бальзама с отличным от нуля температурным коэффициентом dn/dT появляется дополнительный механизм формирования температурной отрицательной цилиндрической линзы. В отсутствие других механизмов изменения пропускания среды он приводит к образованию антиволновода и к дефокусировке светового пучка [8]. В связи с этим при использовании излучения с длиной волны 532 нм в ГЖКН

совместно действуют два приводящих к дефокусировке пучка процесса – образование отрицательной градиентной линзы за счет генерации неравновесных носителей заряда и за счет разогрева среды. Это обуславливает более быстрое насыщение зависимости ограничения излучения и ее последующий быстрый спад с ростом интенсивности излучения на входе (кривая 2 на рис.5).

При прохождении через ГЖКН излучения с длиной волны 633 нм процесс образования волноводного канала вследствие поляризации среды конкурирует с процессом образования антиволновода из-за разогрева материала матрицы композита. Поэтому на начальной стадии с ростом интенсивности I_{in} увеличение показателя преломления преобладает над его температурным уменьшением и наблюдается просветление среды. Затем из-за насыщения примесного поглощения начинает преобладать процесс создания антиволновода, что приводит к уменьшению пропускания среды. Именно наличие процесса насыщения, тормозящего развитие самофокусировки света в среде, и дальнейший рост интенсивности волны на входе в ГЖКН способствуют формированию в композите многослойных волноводов, что вызывает экспериментально наблюдаемое изменение интенсивности излучения, распространяющегося в приосевой области (см. рис.6). Данное явление объясняет ход зависимости β на рис.5.

Поскольку степень поляризованности среды и коэффициент потерь световой мощности в ней зависят от количества наночастиц в ГЖКН, то порог насыщения и число наблюдаемых осцилляций пропускания среды оказываются зависящими от концентрации наночастиц, что подтверждается экспериментальной зависимостью пропускания (рис.7), полученной для объемной концентрации наночастиц Al_2O_3 , равной 0.03 %.

Сравнение приведенных на рис.4, 5, 7 кривых указывает на существенную зависимость эффективности пропускания ГЖКН от материала жидкофазной матрицы и концентрации наночастиц Al_2O_3 . Проявление этой зависимости связано, по-видимому, с возникновением сильного поляризационного взаимодействия индуцированных зарядов в окрестности поверхности раздела наночастица – диэлектрическая матрица, которое наблюдается в гетерофазных структурах [16]. Поскольку величина такого взаимодействия зависит от соотношения диэлектрических проницаемостей компонентов ГЖКН, это позволяет управлять их характеристиками посредством подбора материала жидкофазной матрицы.

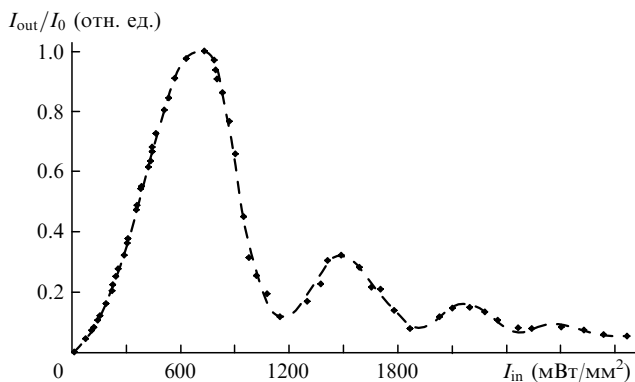


Рис.7. Зависимость интенсивности излучения, прошедшего через ГЖКН на основе иммерсионного масла, от интенсивности падающего излучения при $\lambda = 633$ нм, объемной концентрации наночастиц 0.03 %, $I_0 = 730$ мВт/мм².

4. Выводы

Исследование нелинейно-оптических эффектов в гетерогенных жидких наночастицах композитах на основе наночастиц Al_2O_3 показало, что в результате взаимодействия излучения с комплексом наночастицы – жидкофазная матрица наблюдается низкопороговая нелинейность показателя преломления, коэффициентов рассеяния и поглощения композитной среды, проявляющаяся в зависимости пропускания среды от длины волны излучения и обусловленная характеристиками материала жидкофазной матрицы, а также концентрацией наночастиц в ГЖКН.

Наблюдаемая нелинейность оптических характеристик связана с наличием в запрещенной зоне наночастиц Al_2O_3 большого количества дополнительных энергетических уровней и зон с ограниченным числом занятых и разрешенных состояний, что связано со сложной геометрической формой наночастиц и проявляется, главным образом, в широкозонных материалах.

В зависимости от длины волны используемого излучения нелинейность пропускания может проявляться как в ограничении излучения, так и в просветлении ГЖКН. Определяющими механизмами этой низкопороговой оптической нелинейности являются зависящие от длины волны излучения самофокусировка и дефокусировка излучения, возникающие вследствие модуляции показателя преломления среды при генерации неравновесных носителей заряда или поляризации среды при возбуждении состояний носителей заряда, а также слабо зависящая от длины волны, но зависящая от материала жидкофазной матрицы дефокусировка излучения, обусловленная температурной модуляцией показателя преломления гетерогенной среды.

Полученные результаты могут быть использованы для создания низкопороговых оптоэлектронных устройств управления излучением и обработки информации.

Исследования частично поддержаны грантом РФФИ-ДВО РАН (№ 06-02-96001-р_восток_a) и программой фундаментальных исследований Отделения физики РАН «Когерентное излучение полупроводниковых лазеров и структур».

1. Шкляев А.А., Ичикава М. *УФН*, **176** (9), 913 (2006).
2. Agronovich V.M. et al. *Sol. St. Commun.*, **102**, 631 (1997).
3. Покутний С.И. *ФТП*, **40** (2), 223 (2006).
4. Михеева О.П., Сидоров А.И. *ЖТФ*, **74** (6), 77 (2004).
5. Ушаков Н.М., Юрков Г.Ю. и др. *Оптика и спектроскопия*, **101** (2), 262 (2006).
6. Пул Ч., Оуэнс Ф. *Нанотехнологии* (М.: Трансфера, 2004).
7. Коленко Е.А. *Технология лабораторного эксперимента* (СПб.: Политехника, 1994).
8. Шен И.Р. *Принципы нелинейной оптики* (М.: Наука, 1989).
9. Ахманов С.А., Выслоух В.А. *УФН*, **149** (9), 449 (1986).
10. Литвак Г.А. *Письма в ЖТФ*, **4**, 341 (1966).
11. Пентегов А.П., Пентегова А.В. *Труды Химико-металлургического института АН СССР*, № 7, 27 (1953).
12. Елисеев П.Г., Богатов А.П. *Труды ФИАН*, **166**, 15 (1986).
13. Уханов Ю.И. *Оптические свойства полупроводников* (М.: Наука, 1977).
14. Нокс Р. *Теория экситонов* (М.: Мир, 1966).
15. Агранович В.М., Гинзбург В.Л. *Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теории экситонов* (М.: Наука, 1997 с. 335).
16. Ferrari J.A., Fins E.M., et. al. *Opt. Engn.*, **45** (6), 065001 (1–4) (2006).