На правах рукописи

Харенков Владимир Александрович

ПОРОГОВЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАЦИИ В КРАСИТЕЛЕ Р6Ж С АГЛОМЕРАТАМИ НАНОЧАСТИЦ Ag, Al, Al_2O_3, TiO_2

01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и в Сибирском физико-техническом институте им. акад. В. Д. Кузнецова.

Научный руководитель: **Землянов Алексей Анатольевич,**
кандидат физико-математических наук,
доцент

Официальные оппоненты:

Соломонов Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория квантовой электроники, ведущий научный сотрудник.

Евтушенко Геннадий Сергеевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Защита состоится « ___ » _____ 2016 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 003.024.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: проспект академика Лаврентьева, 13/3, г. Новосибирск-90, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института лазерной физики СО РАН (http://www.laser.nsc.ru).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 003.024.01
при Институте лазерной физики СО РАН,
доктор физико-математических наук

Н. Г. Никулин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы

В последние два десятилетия интенсивно развиваются исследования в области оптики наноразмерных структур и нанофотоники. Это связано с перспективами создания на основе уникальных свойств наноразмерных структур систем и устройств оптоэлектроники, оптической диагностики, информационных технологий нового поколения.

С 90-х годов XX века развивается новое направление лазерной физики, которое в зарубежной литературе получило название *random lasing* (случайная, стохастическая, хаотическая генерация) [1]. В рамках этого направления исследуются вопросы, связанные с лазерной генерацией в нанодисперсных активных средах, таких как, например, растворы и полимерные пленки с лазерными красителями и внедренными наночастицами различных материалов. Возможность безрезонаторной генерации в рассеивающих средах с усилением была показана в теоретической работе В.С. Летохова [2]. В 1994 г. Sha W.L. с соавторами [3] получена генерация в растворе родамина 640 с наночастицами TiO_2. Композитные лазерно-активные среды привлекают внимание исследователей, в том числе и потому, что пороги генерации в таких активных средах существенно ниже, чем в активных средах без наночастиц. Физической причиной развития лазерной генерации в рассеивающих средах с лазерно-активными молекулами принято считать формирование положительной обратной связи в таких композитных средах за счет многократного рассеяния вынужденного вторичного излучения в возбужденной диффузно-рассеивающей активной среде [4].

Современное состояние исследований

Работа по повышению эффективности генерации в таких композитах идет, в основном, в направлении использования в качестве эффективных рассеивателей плазмонно-резонансных наночастиц, к которым в видимом диапазоне относятся наночастицы серебра (Ag) и золота (Au), имеющие максимумы спектров плазмонных резонансов в диапазоне длин волн 390-460 нм для сферических наночастиц Ag и 510-570 нм для сферических наночастиц Au в зависимости от диаметра частиц (по данным обзора [5]).

В плане расширения спектрального диапазона плазмонного взаимодействия ведутся исследования оптических свойств агломератов из двух и более Au и Ag наночастиц, так как агломерация наночастиц расширяет спектр плазмонных колебаний [6]. Кроме того, как показывают расчеты, в промежутке почти соприкасающихся наночастиц в условиях плазмонного резонанса возникает особенно большое усиление локального поля [7], в котором скорость излучения молекул может сильно увеличиваться [8].

С другой стороны, и в отсутствии плазмонно-резонансных эффектов усиление поля вблизи поверхности частицы возможно, если поверхность частицы имеет

высокую степень кривизны – "эффекта молниеотвода" ("*lightning-rod effect*") [9, 10]. Кроме того, из экспериментальных работ [11] известно, что между близкорасположенными металлическими наночастицами возникают локализованные оптические поля повышенной плотности мощности. В этом случае также можно ожидать увеличения скорости спонтанных переходов в излучающих молекулах, что может привести к понижению порога лазерной генерации и увеличению ее эффективности. Это открывает определенные перспективы для создания низкопороговых активных сред при использовании агломерированных неплазмонно-резонансных наночастиц.

Нужно отметить, что к началу работы над темой диссертации не было сообщений об экспериментальных исследованиях, посвященных сравнению влияния одиночных наночастиц и их агломератов на характеристики лазерной генерации в дисперсных активных средах. Отсутствуют сообщения о пространственном распределении излучения *random lasing*, априори считается, что угловое распределение должно быть близким к изотропному в силу того, что механизмом создания положительной связи является диффузное рассеяние на наночастицах. Но *random lasing* проявляется и при слабом рассеянии. Подробно экспериментально изучен вопрос о длинноволновом сдвиге спектра генерации при повышении концентрации красителя, но не проработаны вопросы о спектральных характеристиках *random lasing* при различных концентрациях рассеивающих частиц.

Отсутствуют экспериментальные данные о характеристиках генерации в тонких слоях активной среды. Этот вопрос только в настоящее время стал вызывать интерес в связи с использованием красителей как усиливающих сред для компенсации потерь в метаматериалах [12].

Еще одна проблема связана с влиянием плазмонно-резонансных свойств наночастиц на генерацию. На наш взгляд, совершенно необоснованно в некоторых работах в экспериментах с растворами родамина 6Ж с наночастицами Ag размером 10 нм при накачке излучением на длине волны 532 нм наблюдающиеся эффекты увеличения эффективности генерации по сравнению с суперлюминесценцией в чистом растворе связывают с проявлением плазмонно-резонансных свойств наночастиц Ag, при том, что спектр плазмонного поглощения таких наночастиц никак не перекрывается ни с длиной волны накачки, ни со спектрами поглощения и люминесценции раствора Р6Ж.

Таким образом, в проблеме *random lasing* существует достаточное количество нерешенных вопросов, которые требуют более детального освещения. В связи с вышесказанным, была сформулирована цель и задачи настоящей диссертации.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является установление закономерностей развития генерации в лазерном красителе, допированном агломератами плазмонно-резонансных наночастиц Ag и неплазмонно-резонансных наночастиц Al, TiO_2, Al_2O_3.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы **следующие задачи:**

1. Экспериментальное определение величин порогов лазерной генерации в активной среде с одиночными и агломерированными наночастицами Ag.

2. Сравнение величин порогов лазерной генерации в растворах красителя родамина 6Ж (Р6Ж) с агломерированными наночастицами металлов и диэлектриков одинаковой морфологии при различных концентрациях.

3. Исследование спектральных характеристик генерации в растворах Р6Ж с агломерированными наночастицами при различных концентрациях частиц.

4. Исследование влияния нагрева металлических частиц на характеристики лазерной генерации в растворах красителей (установление энергетического рабочего диапазона генерации).

Методы исследования

Основным методом исследования в работе является физический эксперимент, включающий в себя измерения характеристик исследуемого излучения и результатов воздействия лазерного излучения на объекты исследования.

Научная новизна состоит в том, что впервые:

1. Установлено, что существует такая концентрация агломерированных и одиночных наночастиц Ag, при которой пороги генерации в растворах Р6Ж одинаковы при длине волны излучения накачки 532 нм.

2. Установлено, что агломерированные наночастицы Al понижают пороги лазерной генерации в растворах Р6Ж на такую же величину, как и агломераты наночастиц Ag при одинаковых концентрациях и длине волны излучения накачки 532 нм, несмотря на отсутствие у агломератов наночастиц Al поглощения в видимой области спектра.

3. Показано, что эффективность генерации в растворах Р6Ж с агломератами наночастиц металлов Ag, Al выше, чем при использовании агломератов наночастиц диэлектриков TiO_2, Al_2O_3 при одинаковой морфологии и одинаковом пропускании их взвесей.

4. Установлено, что максимум спектра генерации в слое раствора Р6Ж толщиной 20 мкм смещается в коротковолновую область с ростом концентрации агломератов наночастиц Ag, Al, TiO_2, Al_2O_3 от 0,002 % до 10 % объемной доли с одинаковой динамикой.

5. Установлено, что внедрение агломерированных наночастиц Ag в раствор Р6Ж приводит к расширению диапазона интенсивности накачки, в котором тепловые процессы не оказывают существенного влияния на генерацию в растворе Р6Ж.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Величины порогов лазерной генерации, возбуждаемой излучением на длине волны 532 нм, в слоях растворов Р6Ж с концентрацией 10^{-3} моль/л толщиной ~ 20

мкм с одиночными наночастицами Ag и их агломератами составили ~ $3 \cdot 10^5$ Вт/см^2 при концентрации ~ 0,02 % объемной доли.

2. Введение в раствор родамина 6Ж с концентрацией 10^{-3} моль/л агломератов наночастиц Ag или Al одинаковой морфологии понижает значения порогов генерации до 3-х порядков величины по сравнению с величиной порога, равного ~ $1{,}6 \cdot 10^8$ Вт/см^2, в растворе без наночастиц при толщине активной области ~ 20 мкм, при этом пороговые характеристики генерации для агломератов наночастиц Al и Ag значимо не отличаются.

3. Величины порогов лазерной генерации в слое раствора Р6Ж с концентрацией 10^{-3} моль/л толщиной ~ 20 мкм одинаковы при концентрациях агломератов наночастиц Ag, Al, Al_2O_3 в диапазоне ~ 1-3 % объемной доли, при других концентрациях пороги генерации в растворах с агломератами наночастиц Ag, Al существенно меньше.

4. В растворе Р6Ж с концентрацией 10^{-3} моль/л с агломератами наночастиц Ag в объемной доле ~ 2 % величина порога генерации уменьшается на порядок относительно порога взрывного вскипания, что обеспечивает стабильную генерацию в диапазоне накачки от ~ $2 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$ Вт/см^2.

Практическая значимость

1. Экспериментально показанное одинаковое влияние агломерированных наночастиц Ag и Al на характеристики генерации дает возможность заменять наночастицы Ag на более дешевые наночастицы Al в нанодисперсных активных средах.

2. Добавление агломерированных наночастиц Ag в активные среды на основе лазерных красителей позволяет создавать активные элементы микронных размеров, которые не будут разрушаться под воздействием излучения накачки.

Материалы, представленные в диссертации, использовались при выполнении: Государственного контракта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» № П367 «Исследование физических процессов в атмосферном жидкокапельном аэрозоле при возбуждении мощными фемтосекундными лазерными импульсами»; Тематического плана Томского государственного университета 2009-2011 гг. «Исследование спектрально-энергетических характеристик активных лазерных сред на основе наноструктур», шифр 1.11.09; НИР Томского государственного университета, являющегося особо ценным объектом культурного наследия народов РФ, проводимой по заданию Министерства науки и образования РФ в 2010 г. «Изучение механизмов флуоресценции и лазерной генерации в композитах «органический краситель – наночастицы» для создания эффективных излучателей и преобразователей частоты оптического диапазона», шифр 1.9.10; Государственного задания Министерства образования и науки РФ на 2012-2014 годы, регистр. № 2.4219.2011 «Взаимодействие лазерного излучения с нанодисперсными средами».

Достоверность полученных результатов и выводов обусловлена: использованием современных методов регистрации сигналов; применением сертифицированных и метрологически поверенных приборов при проведении экспериментов; повторяемостью результатов и их соответствием результатам других работ для частных случаев совпадения условий экспериментов (с учетом погрешности). Экспериментально полученные результаты работы не противоречат теоретическим представлениям и расчетам, полученными другими авторами.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы были представлены на: 15-й, 18-й, 20-й, 21-й Всероссийских научных конференциях студентов-физиков и молодых ученых «ВКНСФ», Кемерово-Томск, 2009, Красноярск, 2012, Ижевск, 2014, Омск, 2015; Молодежной научной конференции ТГУ 2009 г., Томск, 2009; 16-й, 18-й Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ), Томск, 2010, 2012; III, IV, V Международных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы радиофизики» (АПР), Томск, 2010, 2012, 2013; Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», Томск, 2011, 2014; Международной молодежной конференции «Лазерная физика, наноструктуры, квантовая микроскопия», Томск, 2012; Всероссийской молодежной научной школе «Актуальные проблемы физики», Таганрог-Ростов-на-Дону, 2012; 13th, 14th, 15th, 16th International conference of young specialists on Micro/Nanotechnologies and electron devices “EDM”, Erlagol (Altai), 2012, 2013, 2014, 2015; XI International conference “Atomic and molecular pulsed laser - AMPL”, Tomsk, 2013; XIX, XX, XXI Международных симпозиумах «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Барнаул, 2013, Новосибирск, 2014, Томск, 2015; Международной молодежной научной школе «Актуальные проблемы радиофизики», Томск, 2014; XI Международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи «SIBKON-2015», Омск, 2015.

Материалы диссертации достаточно полно изложены в 20 опубликованных работах, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в Перечень российских рецензируемых журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук (из них 2 статьи в российском журнале, переводная версия которого индексируется в Web of Science), 1 монография (в соавторстве), 1 статья в зарубежном научном журнале, 6 статей в российских научных журналах, 9 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций и симпозиумов (из них 2 публикации в сборниках материалов, индексируемых в Web of Science, и 4 публикации в сборниках материалов, индексируемых в Scopus).

Личный вклад автора

Автор диссертации принимал участие в подготовке и выполнении всех экспериментальных исследований, обработке полученных данных, а также интерпретации полученных результатов. Участвовал в написании статей и монографии, готовил материалы для докладов на конференциях и лично представлял их. Представленные в работе результаты являются итогом исследований, проводимых автором во время обучения в аспирантуре РФФ ТГУ в лаборатории распространения оптических волн СФТИ ТГУ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 124 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 123 страницы. Работа содержит 73 рисунка и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы и сформулированы цель и задачи, научная новизна работы и положения, выносимые на защиту.

В главе I представлен обзор экспериментальных и теоретических результатов, которые легли в основу современных представлений о формирования вынужденного излучения в нанодисперсных активных средах. Приводится качественная модель развития безрезонаторной генерации в растворах и пленках с красителем, допированных наночастицами, которая состоит в формировании положительной обратной связи в активной среде за счет многократного рассеяния вынужденного излучения наночастицами. Поскольку возможность рассеянному фотону вернуться за счет многократного рассеяния в исходную точку в усиливающей среде мала, то вероятность проявления интерференционных эффектов из-за возможного возникновения кольцевого резонатора также незначительна. Поэтому такой тип лазера был назван случайным лазером с безрезонаторной или некогерентной обратной связью (*random laser with non-resonant or incoherent feedback*). В первой части главы I описываются результаты основных экспериментальных работ, в которых наблюдалось существенное уменьшение энергетических порогов возникновения вынужденного излучения в активных средах с наночастицами различной природы. Даны результаты теоретических работ, касающихся построения моделей развития *random lasing* в нанорассеивающей активной среде, приводятся выражения для определения энергетических порогов генерации в таких средах. Во второй части главы 1 рассматриваются механизмы усиления локального поля вблизи поверхности с большой кривизной, механизм локализованных поверхностных плазмонов, формирования резонансных и нерезонансных полей в зависимости от формы и размера наночастиц. На основании анализа литературных данных в заключении **главы I** даны теоретические предпосылки, которые легли в основу экспериментальных исследований данной работы и постановка задачи.

В начале **главы II** представлена созданная совместно с Булыгиным А.Д. теоретическая модель развития генерации в активной среде с наночастицами с учетом фактора Парселла, из которой следует, что внедрение агломерированных наночастиц в лазерный краситель будет приводить к понижению порога лазерной генерации.

Исходя из приведенной модели, пороговые условия генерации можно записать в виде [9*, 14*][1]:

$$I_L > \frac{\left(I_d \sigma_{abs}(\omega)\cdot\langle\mu\rangle + \hbar\omega_L \Gamma_{\partial V}\right)}{2\sigma_{abs}^2(\omega)\cdot\left\langle\mu^2\right\rangle \dfrac{I_d}{\hbar\omega_L \Gamma_f^{rad}}}$$

где I_L – интенсивность исходного лазерного излучения на частоте ω_L; I_d – интенсивность излучения одной молекулы люминофора; $\sigma_{abs}(\omega)$ – контур спектральной линии поглощения наночастиц; $\langle\mu\rangle$ – средний фактор усиления Парселла; $\hbar$ – постоянная Планка; $\Gamma_{\partial V}$ – скорость выхода световой энергии через поверхность среды, падающая, как с увеличением резонансных свойств объема [13], так и с уменьшением длины свободного пробега фотонов [14]; Γ_f^{rad} – скорость спонтанной релаксации молекул люминофора. В формуле нижний индекс f означает, что величина относится к процессу излучения люминофора, а индекс L означает, соответственно, что величина относится к исходному лазерному излучению. Из неравенства видно, что с увеличением среднего значения $\langle\mu\rangle$, при $\sigma_{abs}(\omega)\langle\mu\rangle \ll \hbar\omega_L\Gamma_{\partial V}$ порог генерации обратно пропорционален $\langle\mu\rangle^2 + \langle\delta\mu\rangle^2$, а при $\sigma_{abs}(\omega)\langle\mu\rangle \gg \hbar\omega_L\Gamma_{\partial V}$ – пропорционален $\langle\mu\rangle / \left(\langle\mu\rangle^2 + \langle\delta\mu^2\rangle\right)$. Вклад в общее излучение от генерации пропорционален среднеквадратичной величине фактора усиления Парселла $\langle\mu^2\rangle$ и, следовательно, растёт не только с увеличением среднего значения $\langle\mu\rangle$, но и с увеличением пространственной дисперсии фактора усиления Парселла.

Таким образом, на порог генерации величина дисперсии фактора Парселла оказывает существенное влияние. Последнее замечание указывает на направление оптимизации различных практических методов, основанных на эффектах генерации в активных средах с наночастицами, путём управления именно величиной дисперсии фактора усиления Парселла. Это может быть достигнуто, например, использованием наночастиц сложной формы. Далее, если интегральный вклад (по пространству) от “холодных” областей превышает интегральный вклад от “горячих” областей, то сдвиг центра спектральной линии будет в красную область относительно пика спонтанной люминесценции (реабсорбция), а в противоположном случае, когда реализуется вынужденный механизм излучения, в синюю область спектра.

[1] [11*] – символом "*" отмечены ссылки на публикации из списка основных работ, опубликованных автором по теме диссертации

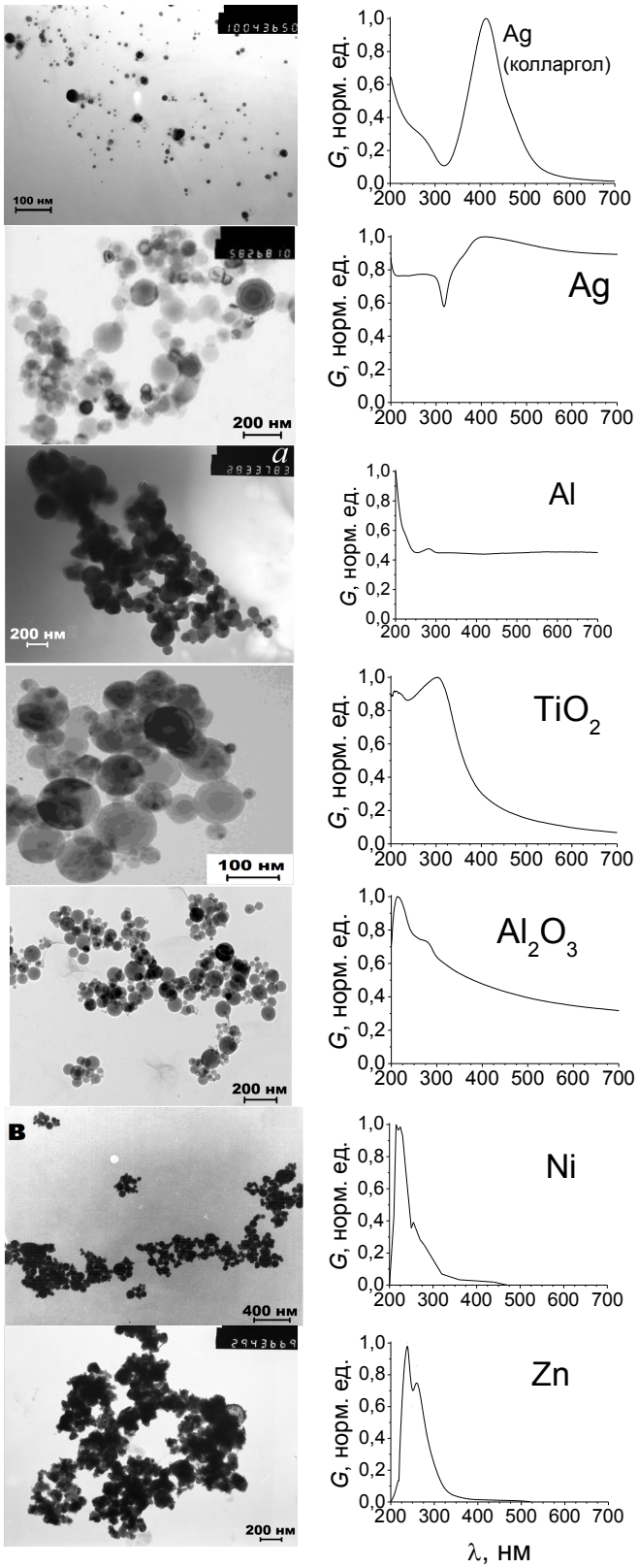
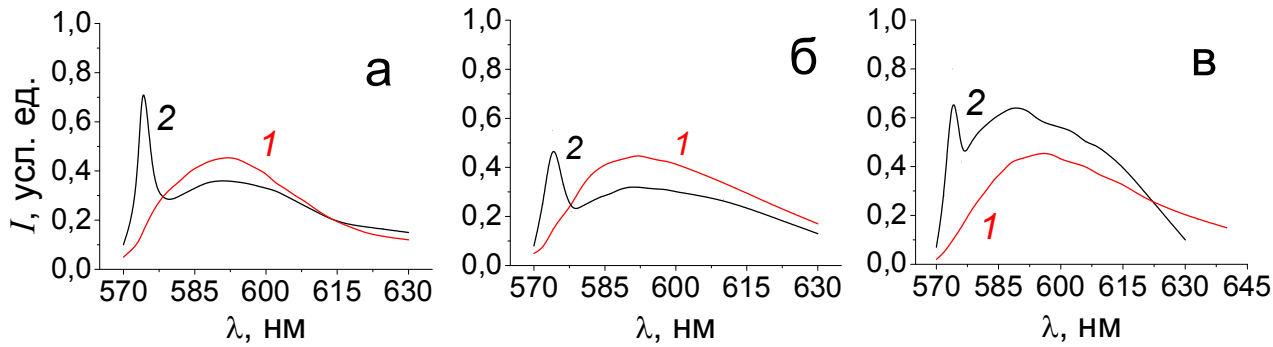


Рисунок 1 – Микрофотографии наночастиц (слева) и соответствующие им спектры ослабления (*G*) – справа

Представлен анализ одиночных наночастиц Ag и агломерированных наночастиц металлов Ag, Al, Zn, Ni и диэлектрических наночастиц TiO_2, Al_2O_3. Агломераты Ag, Al, Zn, Ni, Al_2O_3 получены методом электровзрыва в атмосфере азота. Фотографии этих частиц, полученные на электронном микроскопе, представлены на рисунке 1, слева. Видно, что используемые агломераты имеют схожую морфологию и представляют собой скопления близкорасположенных сферических наночастиц. Полученные распределения наночастиц, составляющих агломераты, показали, что их размеры варьируются от 20 нм до 200 нм, размеры агломератов – 200 нм – 2 мкм. Размеры одиночных наночастиц Ag – 5-15 нм. Рентгеновские дифрактограммы агломератов Ag, Al свидетельствуют о том, что использованные нами агломерированные наночастицы являются металлами, а не оксидами металлов.

Спектры ослабления, полученные на спектрофотометре Shimadzu UV-3600, представлены на рисунке 1, справа. Можно сказать, что одиночные наночастицы Ag имеют ярко выраженный плазмонный резонанс в районе длины волны 420 нм, агломераты Ag имеют максимум поглощения также в районе длины волны 420 нм, все остальные – в диапазоне 200-300 нм. То есть, их спектры поглощения (кроме частиц Ag) не перекрываются ни с длиной волны излучения возбуждения (532 нм), ни со спектрами поглощения и люминесценции используемого красителя родамин 6Ж.

На рисунке 2 представлены спектры свечения растворов Р6Ж с концентрацией 10^{-2} моль/л в кювете толщиной 600 мкм с агломератами наночастиц Al, Ni, Zn с концентрацией C_v = 2% объемной доли при допороговой (1) и надпороговой (2) энергии накачки [4*]. Спектральные картины свечения растворов, представленные на рисунке 2, однотипны для всех наночастиц и представляют собой ярко выраженный узкополосный спектральный пик в коротковолновой области спектра и типичный спектр спонтанной люминесценции Р6Ж в более длинноволновой области спектра. Временные характеристики импульсов свечения растворов измерялись с помощью ФК-26 и осциллографа С7-19.



а – Al; б – Ni; в – Zn (1 – спектр свечения чистого красителя, 2 – спектр свечения раствора с наночастицами (спектр измерен на проход))

Рисунок 2 – Спектр свечения раствора Р6Ж с наночастицами в кювете 600 мкм

Форма импульса свечения в районе коротковолнового максимума близка к форме импульса накачки, а длительность не превышает длительности лазерного импульса. Это свидетельствует о стимулированном характере излучения, относящегося к коротковолновому спектральному пику. Импульс свечения, соответствующий длинноволновому спектральному максимуму, имеет большую длительность, чем импульс накачки, поэтому это излучение можно отнести к излучению спонтанной люминесценции.

Было установлено, что соотношение максимума спектрального пика генерации к максимуму спектра спонтанной люминесценции составляет для агломератов наночастиц Al – 2, Ni – 1,5, Zn – 1 при фиксированной энергии накачки. Таким образом, из трех типов агломератов металлических наночастиц, спектры которых не имеют плазмонного поглощения в видимой области, для сравнения характеристик генерации в растворах красителя Р6Ж с наночастицами Ag были выбраны агломераты наночастиц Al.

По спектрам пропускания (T) взвесей в этиловом спирте используемых наночастиц различной концентрации была построена зависимость пропускания на λ = 561 нм (длина волны излучения раствора Р6Ж с концентрацией 10^{-3} моль/л, которое является затравочным для формирования «лавины» генерации) от объемной доли наночастиц (рисунок 3). Пропускание взвесей с агломератами наночастиц Ag, Al, Al_2O_3 одинаково при равной объемной доле наночастиц (за исключением растворов с наночастицами TiO_2 и Ag (колларгол)).

Пространственные характеристики лазерной генерации определены для дисперсных активных сред с агломерированными и одиночными наночастицами и показано, что максимум излучения генерации наблюдается под углом приблизительно 45º к направлению излучения накачки, что продемонстрировано на рисунке 4 [12*]. Данная часть работы была необходима для того, чтобы оценить влияние агломерации наночастиц на параметры излучения, возникающего в растворе красителя Р6Ж, и определения оптимальных условий проведения эксперимента.

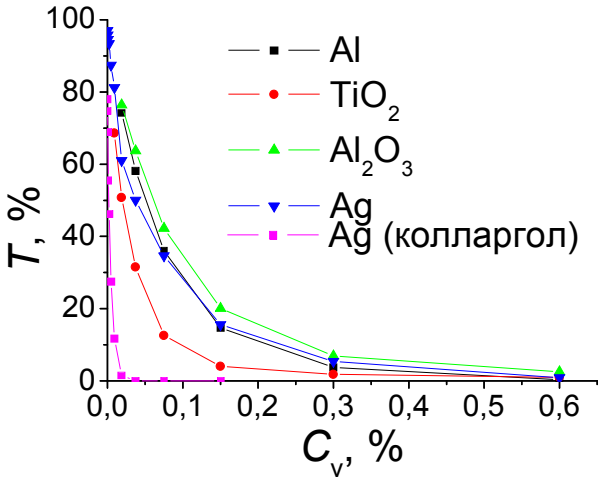
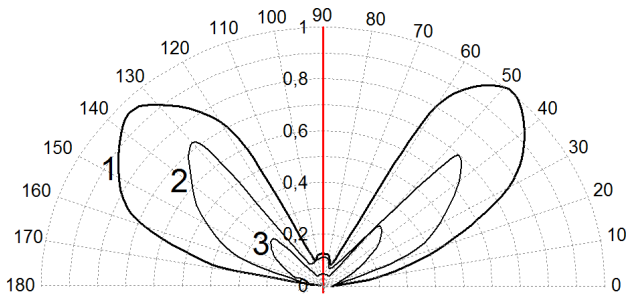


Рисунок 3 – Зависимость пропускания взвеси агломерированных наночастиц в этиловом спирте от объемной доли на длине волны свечения раствора Р6Ж 561 нм



1 – Р6Ж с агломератами Ag; 2 – Р6Ж с одиночными наночастицами Ag; 3 – раствор красителя Р6Ж

Рисунок 4 – Пространственное распределение интенсивности излучения рабочих растворов

Глава III посвящена описанию экспериментальных исследований пороговых и спектральных характеристик генерации в лазерном красителе с наночастицами.

В ходе эксперимента сфокусированное лазерное излучение Nd:YAG-лазер Lotis TII LS-2132 UTF (λ = 532 нм, длительность импульса 6 нс, частота повторения импульсов 1 Гц) направлялось в рабочую кювету с раствором лазерного красителя Р6Ж и наночастицами. Окно коллиматора приемной системы, имеющей угол поля зрения 3°, устанавливалось под углом в 45°. Эксперименты проводились при использовании кювет толщиной 10 мм, 2 мм, 20 мкм.

По результатам проведенных экспериментов были получены спектрально-энергетические характеристики генерации в растворах Р6Ж с наночастицами. На рисунке 5 представлены типичные спектры спонтанной люминесценции и генерации (рисунок 5, а). На рисунке 5, б представлены зависимости интенсивности свечения ($I_{св}$) растворов с наночастицами (кривая 1) и полуширины спектра ($\Delta\lambda$) свечения растворов (кривая 2) от интенсивности накачки ($I_н$).

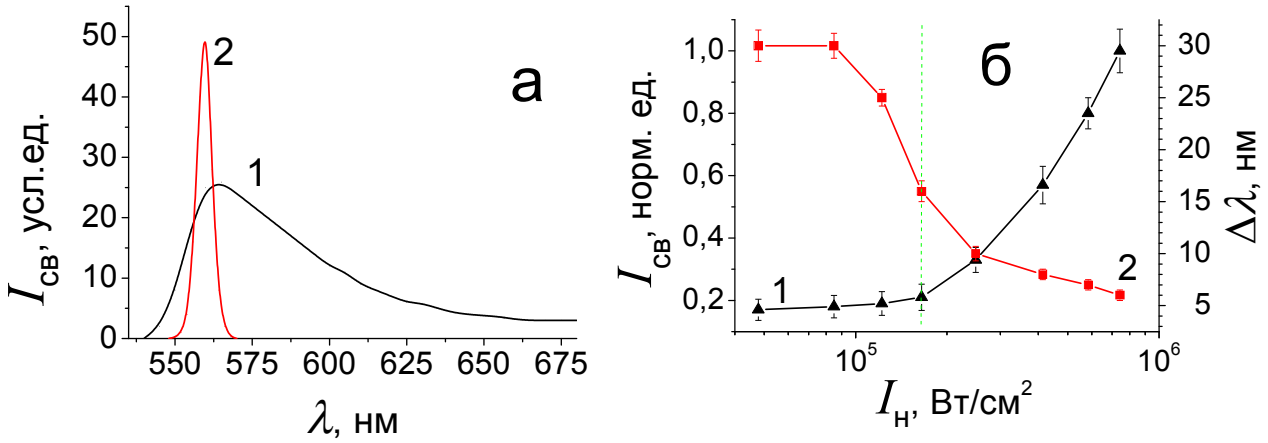
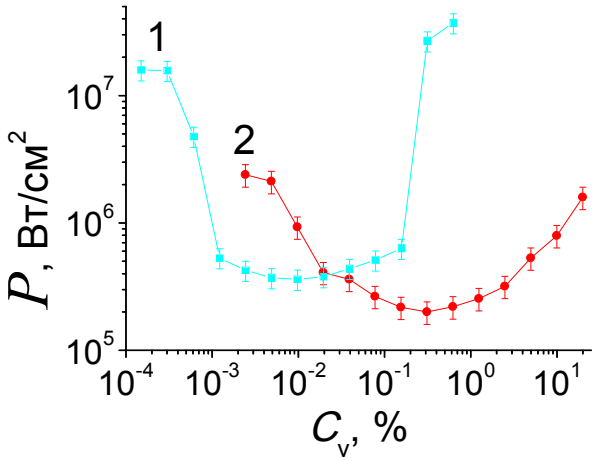


Рисунок 5 – а) спектры спонтанной люминесценции (1) и генерации (2);
б) 1 – зависимость интенсивности свечения от интенсивности накачки ($I_н$);
2 – зависимость полуширины спектра от $I_н$ (пунктирная линия, проходящая через две кривые, обозначает порог генерации)

Видно, что с ростом энергии накачки полуширина линии свечения резко уменьшается от 30 нм до 5 нм и менее в достаточно узком интервале плотности мощности накачки. В этом же интервале происходит резкое увеличение угла наклона зависимости интенсивности свечения раствора от плотности мощности накачки (кривая 1). За пороговые значения интенсивности накачки во всех экспериментах принималось значение интенсивности накачки, соответствующее середине переходной линии зависимости $\Delta\lambda$ ($I_н$). При создании между стеклами клина 3,1°, т.е. при устранении возможного резонатора Фабри-Перо, характеристики генерации не изменялись.

Зависимости порогов генерации от объемной концентрации одиночных наночастиц и агломерированных наночастиц Ag в слое толщиной 20 мкм раствора Р6Ж (С = 10^{-3} моль/л) представлены на рисунке 6. Видно, что в диапазоне концентрации 0,02-0,04 % объемной доли пороги генерации для одиночных и агломерированных наночастиц Ag практически одинаковы. При меньших концентрациях в растворах с одиночными наночастицами пороги ниже, чем у агломерированных, в противном случае – пороги выше. На основании этих результатов были сформулированы 1-е защищаемое положение и научная новизна.

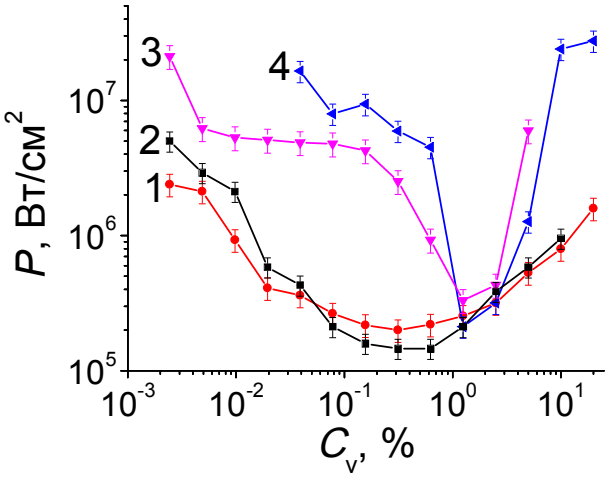


1 – одиночные наночастицы Ag;
2 – агломераты Ag

Рисунок 6 – Зависимость порога генерации от объемной доли наночастиц в растворе красителя Р6Ж

Таким образом, агломераты наночастиц Ag и одиночные наночастицы Ag при определенных концентрациях частиц могут оказывать одинаковое влияние на

эффективность генерации. Отметим, что порог генерации раствора красителя Р6Ж в 20 мкм кювете без наночастиц составляет ~ 30 мДж или ~ $1{,}6 \cdot 10^8$ Вт/см^2.



1 – Ag; 2 – Al; 3 – Al_2O_3; 4 – TiO_2

Рисунок 7 – Зависимость порога генерации от объемной доли агломератов наночастиц в растворе красителя Р6Ж

В дальнейших экспериментах производилось сравнение влияния агломерированных наночастиц металлов Ag, Al и диэлектриков TiO_2, Al_2O_3 одинаковых размеров и морфологии на лазерную генерацию в растворе красителя. В результате ряда экспериментов была получена зависимость пороговой интенсивности генерации в растворе красителя Р6Ж (толщина слоя 20 мкм) от концентрации наночастиц (рисунок 7) [5*, 6*]. Необходимо отметить схожее поведение зависимостей внутри двух групп: металлов и диэлектриков. Кроме этого в каждой из групп зависимостей (группа «металлы» и группа «диэлектрики») можно выделить следующие области:

1) область уменьшения порога генерации при возрастании объемной доли наночастиц – левая ветвь;

2) область (слабой зависимости от концентрации частиц) слабых флуктуаций (слабого изменения) порога генерации при увеличении количества наночастиц – центральная область;

3) область возрастания порога генерации с увеличением концентрации наночастиц – правая ветвь.

Согласно этим зависимостям агломераты наночастиц Ag и Al оказывают одинаковое влияние на изменение порога генерации в растворах родамина 6Ж, что может быть связано с одинаковыми нерезонансными локальными полями вблизи поверхности агломератов. При этом происходит понижение порогов генерации до 3-х порядков величины по сравнению с раствором Р6Ж без наночастиц. Стоит отметить, что интенсивности излучения генерации от концентрации агломератов Ag и Al (рисунок 8) в запороговом режиме (при энергиях накачки на 20 % больше пороговых энергий) одинаковы [5*]. Кроме того, наибольшее значение

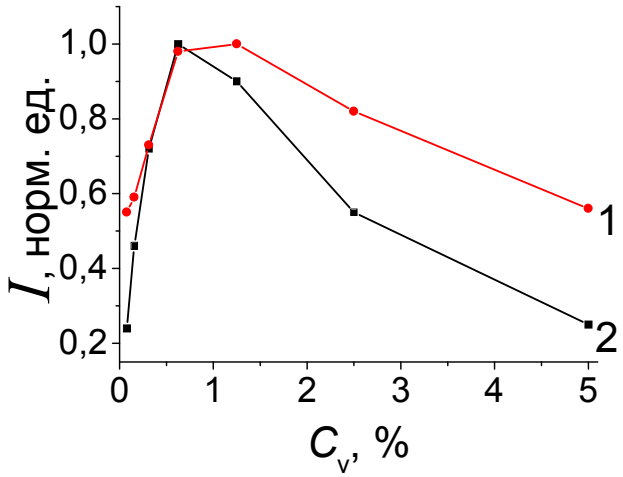
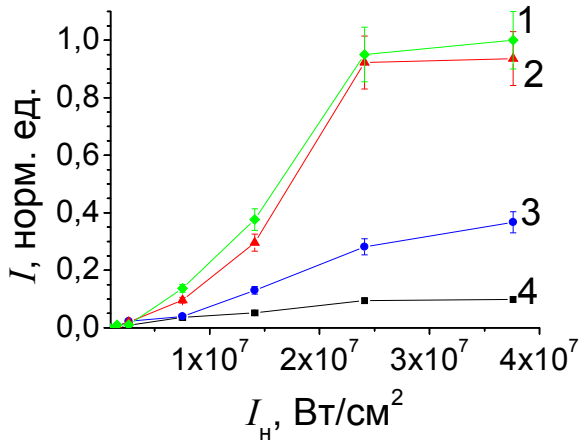


Рисунок 8 – Зависимость нормированных интенсивностей свечения раствора красителя Р6Ж с агломерированными наночастицами Ag (1) и Al (2) от их объемной доли

интенсивности лежит в том же самом интервале концентраций наночастиц Ag и Al в растворе красителя, что и наименьшие пороги генерации (рисунок 8). Таким образом, при данных условиях эксперимента этот интервал концентраций является оптимальным с точки зрения генерации.

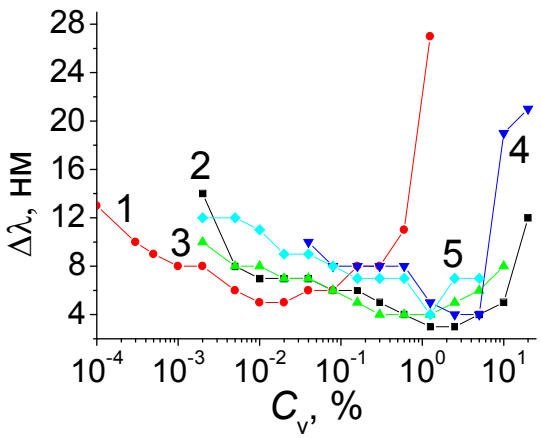
Весьма интересным является то, что при концентрациях 1-3 % объемной доли агломератов наночастиц Ag, Al, Al_2O_3 пороги генерации в растворе Р6Ж одинаковы. При этом если рассматривать интенсивность генерации раствора красителя Р6Ж с этими наночастицами, то в запороговом режиме интенсивность генерации с металлами в несколько раз превосходит интенсивность аналогичного раствора с диэлектриками (рисунок 9). Кроме этого, из рисунка 9 можно увидеть, что зависимости для Ag и Al вновь не имеют существенных отличий.

Параллельно исследованию пороговых характеристик генерации, исследовались и спектральные особенности излучения. Зависимость полуширины спектральной линии от объемной доли наночастиц в растворе Р6Ж приведена на рисунке 10.



1 – Al; 2 – Ag; 3 – Al_2O_3; 4 – TiO_2

Рисунок 9 – Зависимость интенсивности свечения раствора Р6Ж с наночастицами от интенсивности накачки



1 – Ag (колларгол), 2 – Ag, 3 – Al, 4 – Al_2O_3, 5 – TiO_2

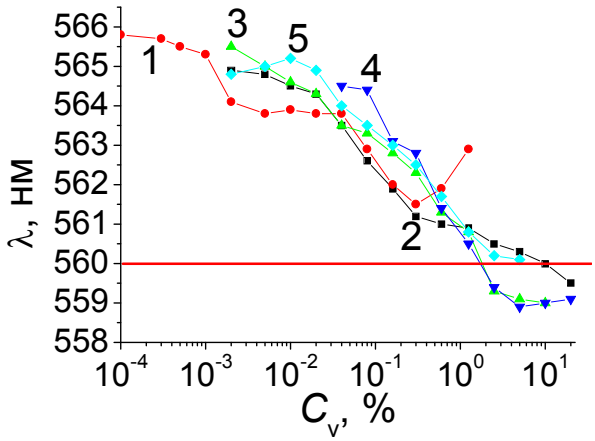
Рисунок 10 – Зависимость полуширины спектральной линии от объемной доли наночастиц

Видно, что на протяжении нескольких порядков объемной доли полуширина спектральной линии генерации для всех материалов уменьшается приблизительно с 10 до 5 нм. Важным наблюдением при исследовании спектральных особенностей генерации в растворе красителя с различными концентрациями наночастиц было то, что при увеличении объемной доли агломератов от 0,02 % до 10 % происходит коротковолновой сдвиг максимума спектра генерации на ~ 5 нм, при этом динамика сдвига была одинакова для всех использованных наночастиц (рисунок 11, сплошной горизонтальной линией отмечено свечение 20 мкм слоя раствора красителя Р6Ж).

На основании полученных закономерностей сформулированы 2-е, 3-е защищаемые положения, новизна и практическая значимость диссертации.

Помимо этого в III главе представлен анализ пороговых зависимостей и получено повышение эффективности генерации в растворе флуоресцеина натрия

(уранин) при добавлении 0,6 % объемной доли агломерированных наночастиц Ag и воздействии наносекундного излучения с длиной волны λ = 355 нм.



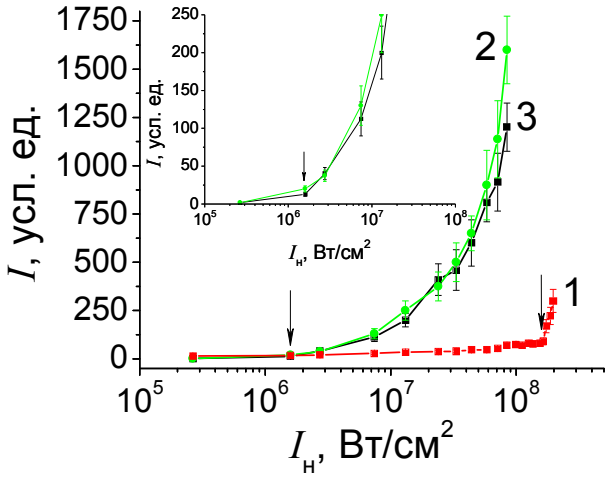
1 – Ag (колларгол); 2 – Ag; 3 – TiO_2; 4 – Al; 5 – Al_2O_3

Рисунок 11 – Зависимость длины волны максимума спектра генерации от объемной доли наночастиц

В заключительной части главы III описывается исследование влияния нагрева металлических частиц на характеристики лазерной генерации в растворах красителей с целью установления энергетического рабочего диапазона активной среды, результаты которых легли в основу 4-го защищаемого положения.

В ходе эксперимента рассматривались спектрально-энергетические характеристики свечения растворов и характеристики акустических откликов возбуждаемой среды. В эксперименте использовался раствор Р6Ж (10^{-3} моль/л) в кювете толщиной 140 мкм с агломератами наночастиц Ag объемной долей 2%. Кроме того, было установлено, что в кювете 140 мкм раствор Р6Ж с наночастицами Ag и Al также имеет одинаковую зависимость интенсивности свечения от интенсивности накачки (рисунок 12) [2*, 4*].

Исследования тепловых процессов проводились акустическим методом, основанным на регистрации акустического импульса, формируемого в области взаимодействия лазерного излучения с веществом и возникающего вследствии скачка давления при изменении плотности среды из-за нагрева или взрывного вскипания. Звуковой сигнал, возникающий при возбуждении рабочего раствора лазерным излучением накачки, регистрировался микрофоном Masskette MTG MK301 с полосой пропускания до 2,5 МГц. В результате были получены следующие зависимости (рисунок 13) [1*, 4*, 17*].

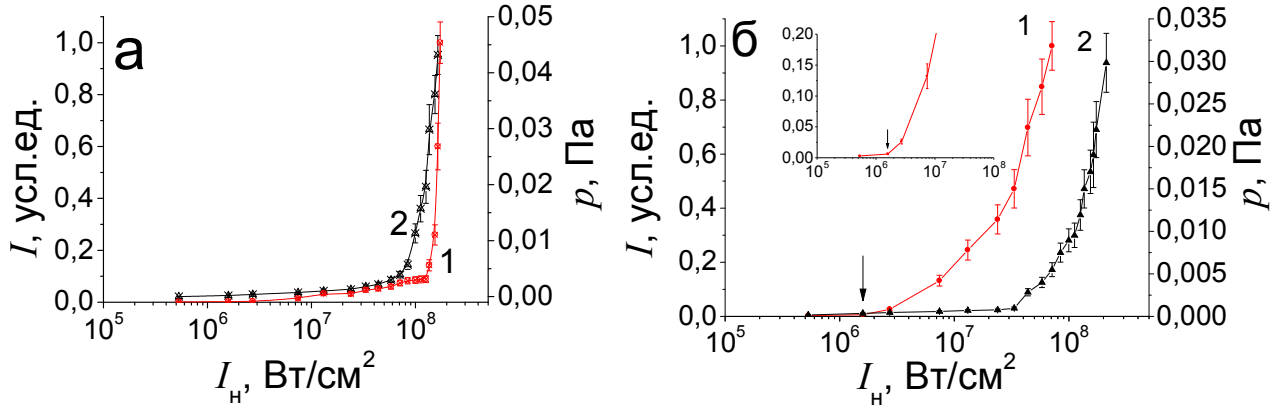


На вставке продемонстрирована в увеличенном масштабе область порога генерации в растворе с наночастицами, стрелками отмечены пороги генерации

Рисунок 12 – Зависимость интенсивности свечения раствора Р6Ж (1) с агломератами наночастиц Ag (2) и Al (3) в 140 мкм кювете от интенсивности накачки

Из рисунка 13 видно, что при определенных энергиях излучения накачки линейный рост зависимости акустического сигнала от энергии скачкообразно изменяется на его более интенсивный рост. Резкое возрастание величины акустического сигнала сопровождается появлением паровых пузырьков в зоне

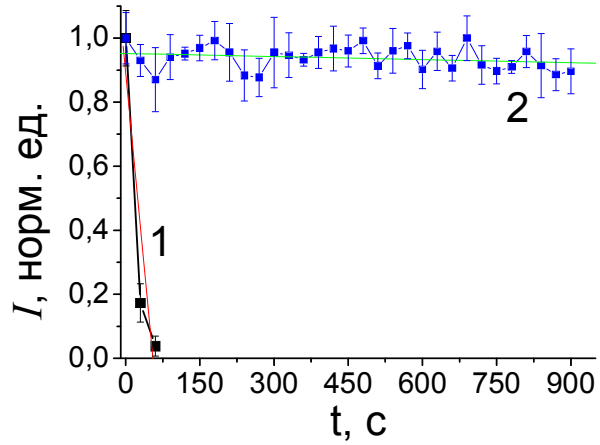
взаимодействия лазерного излучения накачки с раствором. При этом длительность акустического сигнала составляла около 2 мс. Кроме того, в пользу взрывного вскипания говорит наблюдающийся выброс жидких аэрозольных частиц с поверхности раствора при снятой верхней стеклянной крышке кюветы.



1 – кривая свечения, 2 – акустическая кривая

Рисунок 13 – График зависимости интенсивности свечения (*I*) и акустического давления (*p*) от интенсивности накачки для раствора Р6Ж (а) с наночастицами Ag (б)

Важным является то, что порог лазерной генерации в кювете 140 мкм с раствором красителя Р6Ж в 2 раза больше, чем порог взрывного вскипания в этой среде. При добавлении агломератов наночастиц Ag в объемной доле 2 % порог генерации уменьшается на порядок относительно порога взрывного вскипания.



1 – раствор Р6Ж, 2 – раствор Р6Ж с агломератами Ag

Рисунок 14 – Кинетика свечения растворов

Все нелинейные процессы, связанные с нагревом и взрывным вскипанием приводят к деградации либо полному разрушению раствора. На рисунке 14 приведены графики кинетики свечения рабочих растворов (чистого и с наночастицами) при фиксированных накачках в режиме генерации [1*, 17*].

Видно, что чистый раствор красителя деградирует значительно быстрее (в течение минуты, то есть за 60 выстрелов). Раствор с наночастицами практически не меняет своих излучательных свойств, по крайней мере, за 900 выстрелов (время воздействия излучения 15 минут).

Таким образом, при добавлении наночастиц возникает диапазон накачки от $2\cdot10^6$ – $3\cdot10^7$ Вт/см^2, в котором реализуется стабильная генерация, но не происходит взрывного вскипания рабочего раствора красителя.

В заключение диссертации перечислены основные результаты.

1. Введение 2-х процентов объемной доли агломератов наночастиц металлов (Ni, Zn, Al), полученных электровзрывом, с одинаковой морфологией в кювету

толщиной 600 мкм с раствором родамина 6Ж приводит к повышению эффективности вынужденного излучения. При этом соотношение максимума пика генерации к максимуму спонтанной люминесценции составляет для Al – 2, Ni – 1,5, Zn – 1 при фиксированной энергии накачки.

2. Определены пространственные характеристики лазерной генерации дисперсных активных сред с агломерированными и одиночными наночастицами и показано, что максимум излучения генерации наблюдается под углом приблизительно 45° к направлению излучения накачки.

3. Проведено сравнение порогов лазерной генерации в активной среде с одиночными и агломерированными наночастицами Ag. Показано, что в диапазоне концентрации 0,02 – 0,04 % объемной доли пороги генерации для одиночных и агломерированных наночастиц Ag практически одинаковы. При меньших концентрациях в растворах с одиночными наночастицами пороги ниже, чем у агломерированных, в противном случае – пороги выше.

4. В результате сравнения генерационных характеристик было установлено, что при увеличении концентрации агломератов наночастиц Ag, Al, TiO_2, Al_2O_3 от 0,002 % до 10 % максимум спектра генерации смещается в коротковолновую область.

5. Интервал концентраций агломератов наночастиц Al и Ag, при котором пороги генерации остаются практически неизменными, в 5 раз больше, чем для агломератов наночастиц Al_2O_3, TiO_2, а при концентрациях от 1 % до 3 % пороги одинаковы в пределах погрешности. Интенсивность генерации в растворе с наночастицами металлов в 5-8 раз больше интенсивности генерации при добавлении наночастиц диэлектриков.

6. Установлено, что зависимости порогов генерации от концентрации агломератов наночастиц Ag и Al не имеют существенных отличий и описываются двумя степенными функциями с общим решением в области наименьших порогов. Для диэлектрических агломератов наночастиц TiO_2 и Al_2O_3 эти зависимости имеют более сложный вид и описываются другими функциями.

7. Установлены диапазоны интенсивностей накачки, при которых реализуется безрезонаторная лазерная генерация, но не происходит взрывного вскипания рабочего раствора красителя с агломератами наночастиц Ag.

Список использованной литературы

1. Lawandy N. M. Random laser? / N. M. Lawandy, R. M. Balachandran // Nature. – 1995. – Vol. 373. – P. 204-208.

2. Летохов В. С. Генерация света рассеивающей средой с отрицательным резонансным поглощением // ЖЭТФ. – 1967. – Т. 53, № 4. – С. 1442-1452.

3. Sha W. L. Spectral and temporal measurements of laser action of Rhodamine 640 dye in strongly scattering media / W. L. Sha, C.-H. Liu, R. R. Alfano // Opt. Let. – 1994. – Vol. 19, № 23. – P. 1922-1924.

4. Cao H. Lasing in random laser // Waves Random Media. Topical Review. – 2003. – Vol. 13. – R1-R39.

5. Хлебцов Н. Г. Оптика и биофотоника наночастиц с плазмонным резонансом // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, № 6. – С. 504-529.

6. Карпов С. В. Оптическме и фотофизические свойства фрактально-структурированных золей металлов / С. В. Карпов, В. В. Слабко. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2003. – 265 с.

7. Sweatlock L. A. Highly confined electromagnetic fields in arrays of strongly coupled Ag nanoparticles / L. A. Sweatlock, S. A. Maier, H. A. Atwater // Phys. Rev. – 2005. – Vol. 62. – P. 10265-10287.

8. Климов В. В. Оптические свойства атома в присутствии кластера из двух наносфер / В. В. Климов, Д. В. Гузатов // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37. – С. 209-230.

9. Олейников В. А. Трековые мембраны в темплейтном синтезе ГКР-активных наноструктур / В. А. Олейников, Н. В. Первов, Б. В. Мчедлишвили // Критические технологии. Мембраны. – 2004. – Т. 24, № 4. – С. 17-28.

10. Зуев В. С. Наноструктуры в лазерном эксперименте / В. С. Зуев, А. В. Франценссон // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, № 2. – С. 120-126.

11. Zhdanov A. A. Detection of Plasmon – enhanced luminescence fields from an optically manipulated pair of partially metal covered dielectric spheres / A. A. Zhdanov, M. P. Kreuzer, S. Rao // Opt. Lett. – 2008. – Vol. 33, № 23. – P. 43-52.

12. Loss-free and active optical negative-index metamaterials / V. P. Drachev [et al.] // Nature letters. – 2010. – Vol. 466. – P. 735-738.

13. Булыгин А. Д. Теоретическое описание спектра излучения из капли раствора родамина 6Ж в этаноле при фемтосекундном лазерном воздействии / А. Д. Булыгин, А. А. Землянов, Ал. А. Землянов // Опт. атм. и океана. – 2011. – Т. 24, № 11. – С. 954-959.

14. Ramachandran H. Mirrorless lasers // Pramana, J. Phys. – 2002. – Vol. 58, № 2. – P. 313-322.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в журналах, включенных в Перечень российских рецензируемых научных журналов:

1*. Донченко В. А. Особенности суперлюминесценции в растворах Р6Ж с агломерированными металлическими наночастицами / В. А. Донченко, И. А. Едреев, Ал. А. Землянов, **В. А. Харенков** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8. – С. 9–15.

в переводной версии журнала:

Donchenko V. A. Peculiarities of Lasing in Solutions of R6G with Agglomerated Metallic Nanoparticles / V. A. Donchenko, I. A. Edreev, Al. A. Zemlyanov, V. A.

Kharenkov // Russian Physics Journal. – 2013. – Vol. 56, Is. 8. – P. 860-866. – DOI: 10.1007/s11182-013-0110-9.

2*. Донченко В. А. Влияние локальных полей вблизи агломерированных наночастиц на эффективность суперлюминесценции в растворах органического красителя / В. А. Донченко, Ал. А. Землянов, Н. С. Кривошеев, **В. А. Харенков** // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 11. – С. 999–1002.

3*. Донченко В. А. Влияние рассеяния на развитие суперлюминесценции в композитах «раствор красителя – наночастицы» / В. А. Донченко, Ал. А. Землянов, Н. С. Панамарёв, **В. А. Харенков** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2011. – Т. 54, № 4. – С. 88–94.

в переводной версии журнала:

Donchenko V. A. Influence of scattering on superluminescence in composites dye solution – nanoparticles / V. A. Donchenko, A. A. Zemlyanov, N. S. Panamarev, V. A. Kharenkov // Russian Physics Journal. – 2011. – Vol. 54, Is. 4. – P. 493–499. – DOI: 10.1007/s11182-011-9644-x.

Монография:

4*. Донченко В. А. Оптические характеристики нанодисперсных активных сред / В. А. Донченко, Ал. А. Землянов, Н. С. Панамарёв, **В. А. Харенков**. – Томск : Изд-во НТЛ, 2012. – 128 с.

Публикации в прочих научных изданиях:

5*. Zinoviev M. M. Lasing efficiency in microlayers of active medium with agglomerated aluminum or silver nanoparticles / M. M. Zinovev, A. V. Trifonova, Al. A. Zemlyanov, **V. A. Kharenkov** // SIBCON-2015: Proceedings XI International Siberian Conference on Control and Communications. – Omsk, May 21-23, 2015. – Omsk, 2015. – P. 142–145. – DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147072.

6*. Zinoviev M. M. The lasing thresholds comparison in active medium microlayers with metal and dielectric nanoparticles / M. M. Zinovev, Al. A. Zemlyanov, A. V. Trifonova, **V. A. Kharenkov** // EDM-2015: Proceedings XVI International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2015. – Novosibirsk, 2015. – P. 282–284.

7*. **Kharenkov V. A.** Dependence of the lasing efficiency on the concentration of silver nanoparticles in thin layers of dye solutions / V. A. Kharenkov, Al. A. Zemlyanov, I. A. Edreev, V. A. Donchenko // EDM-2014: Proceedings XV International conference of young specialists on Micro/Nanotechnologies and electron devices. – Erlagol, Altai, 30 June – 4 July, 2014. – Novosibirsk, 2014. – P. 327–329. – DOI: 10.1109/EDM.2014.6882540.

8*. **Kharenkov V. A.** The SW shift of the maximum stimulated emission spectrum of the laser dye with silver nanoparticles with different morphologies / V. A. Kharenkov, Al. A. Zemlyanov, I. A. Edreev, V. A. Donchenko, M. M. Zinoviev // EDM-2014: Proceedings XV International conference of young specialists on Micro/Nanotechnologies

and electron devices. – Erlagol, Altai, 30 June – 4 July, 2014. – Novosibirsk, 2014. – P. 330–332. – DOI: 10.1109/EDM.2014.6882541.

9*. Булыгин А. Д. Особенности формирования спектральной картины суперфлуоресенции в присутствии наночастиц металлов / А. Д. Булыгин, **В. А. Харенков**, Ал. А. Землянов, В. А. Донченко // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XX Международного симпозиума (конференция B). – Новосибирск, 23-27 июня 2014 г. – Новосибирск, 2014. – С. B193-B196.

10*. Донченко В. А. О коротковолновом смещении максимума спектра вынужденного излучения лазерного красителя с наночастицами серебра различной морфологии / В. А. Донченко, И. А. Едреев, Ал. А. Землянов, **В. А. Харенков** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/3. – С. 269–271.

11*. **Харенков В. А**. Влияние концентрации наночастиц серебра различной морфологии на эффективность безрезонаторной генерации / В. А. Харенков, В. А. Донченко, Ал. А. Землянов, И. А. Едреев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/3. – С. 239–241.

12*. **Kharenkov V. A.** Angular and energy characteristics of luminescence of solutions of dye R6G with nanoparticles of aluminum / V. A. Kharenkov, A. Y. Iskandarov, I. A. Edreev // EDM-2013: Proceedings XIV International conference of young specialists on Micro/Nanotechnologies and electron devices. Erlagol, Altai 01-05 July, 2013. – Novosibirsk, 2013. – P. 198–201. – DOI: 10.1109/EDM.2013.6641974.

13*. Donchenko V. A. Nanostructured metal aggregate-assisted lasing in rhodamine 6G solutions / V. A. Donchenko, Y. E. Geints, **V. A. Kharenkov**, Al. A. Zemlyanov // Optics and Photonics Journal. – 2013. – Vol. 3, № 8A. – P. 13–17. – DOI: 10.4236/opj.2013.38A002

14*. **Харенков В. А.** Влияние концентрации наночастиц серебра на порог суперфлуоресценции красителя R6G / В. А. Харенков, Ал. А. Землянов, А. Д. Булыгин // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XIX Международного симпозиума (конференция B). – Барнаул, 01-06 июля 2013 г. – Барнаул, 2013. – С. B297-B301.

15*. **Харенков В. А.** Инерционность светового лимитера на базе наночастиц / В. А. Харенков, В. А. Донченко, Ал. А. Землянов, Н. С. Панамарёв // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8/2. – С. 227-229.

16*. **Харенков В. А.** Влияние агломерации наночастиц на эффективность лазерной генерации / В. А. Харенков, В. А. Донченко, Ал. А. Землянов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8/2. – С. 244–246.

17*. Krivosheyev N. S. Investigation of acoustic response of the active gain medium with nanoparticles in the lasing process / N. S. Krivosheyev, **V. A. Kharenkov**, Al. A. Zemlyanov, V. A. Donchenko // EDM-2012: Proceedings XIII International conference and seminar on Micro/Nanotechnologies and electron devices. Erlagol, Altai 02-06 July, 2012. – Novosibirsk, 2012. – P. 208–212. – DOI: 10.1109/EDM.2012.6310218.

18*. **Kharenkov V. A.** Lasing in a thin layer of luminophor with metal nanoparticles agglomerates / V. A. Kharenkov, N. S. Krivosheyev, Al. A. Zemlyanov, V. A. Donchenko // EDM-2012: Proceedings XIII International conference and seminar on Micro/Nanotechnologies and electron devices. Erlagol, Altai 02-06 July, 2012. – Novosibirsk, 2012. – P. 213-216. – DOI: 10.1109/EDM.2012.6310219.

19*. Донченко В. А. Коэффициент усиления оптического излучения в композите «органические краситель – металлические наночастицы» / В. А. Донченко, Ал. А. Землянов, Н. С. Панамарёв, **В. А. Харенков** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9/3. – С. 173–174.

20*. Донченко В. А. Трансформация оптических свойств канала маломощного лазерного пучка в средах с наночастицами / В. А. Донченко, Ал. А. Землянов, Н. С. Панамарёв, **В. А. Харенков** Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9/3. – С. 175–176.