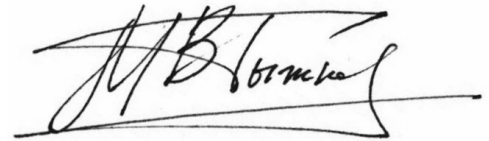


На правах рукописи



Рыжков Михаил Владимирович

Лазерное излучение
в случайно-неоднородных средах на основе ZnO
при наносекундном фотовозбуждении

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007

Работа выполнена в Институте радиотехники и электроники РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Золин Владислав Федорович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Каминский Александр Серафимович

кандидат физико-математических наук
Туркин Андрей Николаевич

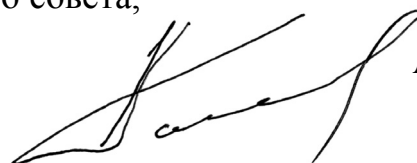
Ведущая организация: Институт проблем лазерных и
информационных технологий РАН
(Московская область, г. Шатура)

Защита диссертации состоится «02» ноября 2007 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д002.231.02 при Институте радиотехники и электроники РАН по адресу 125009, Москва, ул. Моховая, д.11, к.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ РАН

Автореферат разослан «28» сентября 2007 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук



А.А. Потапов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время исследования лазерного эффекта в случайно-неоднородных средах образуют новый раздел физической оптики, который в зарубежной литературе получил название «random lasers» - случайные лазеры. По физике процессов и методам исследования задачи этого раздела смыкаются с задачами о локализации света и фотонных кристаллах. Работы по случайным лазерам ведутся в ряде исследовательских групп разных стран (США, Нидерландов, Италии, Ирландии, Франции, Греции, Украины, Китая, Японии, Сингапура).

Возможность получения лазерного эффекта в случайно-неоднородной среде была теоретически предсказана В.С. Летоховым в 1967, а в 1986 этот эффект был впервые экспериментально продемонстрирован В.М. Маркушевым (ИРЭ РАН) на образцах диэлектрических порошков, активированных ионами неодима. В дальнейшем лазерную генерацию получали и исследовали в различных случайно-неоднородных средах.

С 1998 года в США в группе, возглавляемой Н. Сао, ведутся интенсивные исследования лазерного эффекта на образцах порошков и неупорядоченных пленок оксида цинка при оптическом возбуждении импульсами пикосекундной длительности.

Существенным отличием представляемой работы от американских является использование наносекундной накачки для возбуждения экситонного излучения ZnO с собственным временем жизни экситонов (<200 пс) значительно меньшим длительности импульса накачки. Это затрудняет возбуждение, в частности, повышает порог возникновения лазерного эффекта, но дает возможность получать многоимпульсную, а, возможно, и квазинепрерывную генерацию. Кроме того, такие исследования позволяют оценить возможности создания катодолюминесцентных экранов с очень коротким (~1 нс) временем послесвечения, что необходимо, например, для фоторегистрации быстрых процессов.

Объект исследования

Объектом исследования являются случайно-неоднородные среды на основе оксида цинка (ZnO) – широкозонного прямозонного полупроводника ($E_g \approx 3,3$ эВ при комнатной температуре), в котором энергия связи экситона составляет $E_b \approx 60$ мэВ. При комнатной температуре рекомбинация экситонов в оксиде цинка обуславливает УФ излучение в области 380-390 нм с собственным временем жизни менее 200 пс. Исходя из этого, можно было предположить, что при возбуждении импульсами наносекундной длительности возможно обнаружение интересных особенностей лазерного эффекта в порошках ZnO.

Научная новизна

До 2004 года – момента начала данной работы – в научной литературе не было сообщений о получении лазерного эффекта на порошках ZnO при возбуждении их импульсами ультрафиолетового излучения наносекундной длительности. Таким образом, научная новизна представляемой работы состоит в том, что:

1. впервые получен лазерный эффект на ряде образцов порошков и столбчатых пленок ZnO при возбуждении их импульсами наносекундной длительности;
2. обнаружена зависимость характера лазерной генерации от морфологии порошков;
3. обнаружены и исследованы особенности лазерных спектров случайно-неоднородных сред на основе ZnO;
4. предложена интерпретация происхождения этих особенностей.

Цели и задачи диссертации

Основная цель данной работы сводилась к получению лазерного эффекта при наносекундной накачке, его исследованию и выяснению происхождения обнаруженных особенностей спектров лазерного излучения и их вариаций от одного импульса накачки к другому. Для достижения этой цели была создана экспериментальная установка, позволяющая регистрировать спектры, обусловленные отдельными возбуждающими импульсами.

Достоверность научных положений

Исследования проводились на современном для поставленной задачи оборудовании и результаты неоднократно докладывались и подробно обсуждались на международных конференциях, где получали одобрение.

Практическая ценность результатов

С практической точки зрения наибольший интерес представляет перспектива использования генерирующих порошков для катодолюминесцентных экранов (КЛЭ). Ряд применений электронно-лучевых приборов (ЭЛП) требует существенных усовершенствований их излучающих экранов. Так, использование ЭЛП в оптических корреляторах систем распознавания образов требует ширины спектра КЛЭ 0.1 – 0.2 нм. Для – фоторегистрирующих систем необходима длительность послесвечения порядка наносекунды. Чтобы реализовать эти требования, представляется целесообразным создание КЛЭ, работающих в режиме не спонтанного, а вынужденного излучения. Такую возможность предоставляют случайные (порошковые) лазеры. В частности, значительный интерес представляет возможность использования УФ области спектра, для реализации которой необходимы исследования случайных лазеров на оксиде цинка.

Личный вклад автора

Участие в постановке задачи, разработке экспериментальных установок и алгоритмов моделирования. Проведение и анализ экспериментов.

Область применения результатов

Малые размеры активной среды, простота изготовления и возбуждения позволяют использовать случайные лазеры для тестирования новых активных лазерных сред.

Предложенный в данной работе подход к интерпретации происхождения вариаций лазерных спектров может быть использован для анализа поведения лазерных спектров в других случайно-неоднородных средах.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально продемонстрирован лазерный эффект на ряде образцов порошков и столбчатых пленок ZnO при фотовозбуждении импульсами наносекундной длительности. Порог возникновения и характер лазерной генерации зависят от морфологии порошков.
2. Лазерные спектры порошкообразных образцов ZnO меняются от вспышки к вспышке лазера накачки. Одна из возможных причин наблюдаемого эффекта состоит в том, что число спонтанных фотонов, участвующих в формировании лазерного излучения каждой моды, является случайной величиной. Проведено упрощенное моделирование временного хода процесса лазерной генерации.
3. Количество мод в полидисперсных порошках значительно больше, чем в монодисперсных, кроме того, они спектрально перекрываются, что может приводить к уширению линий.
4. С помощью численного моделирования показано, что флуктуации числа спонтанных фотонов весьма существенны при наличии пространственного перекрытия мод. Это качественно объясняет наблюдавшееся различие вариаций спектров моно- и полидисперсных порошков. Поскольку количество мод в монодисперсном порошке меньше, чем в полидисперсных образцах, вероятность их пространственного перекрытия должна быть в первом случае меньше, чем во втором. При этом роль флуктуаций числа спонтанных фотонов и вариации спектров могут быть меньше.
5. Линии лазерных спектров неупорядоченных структур на основе ZnO при наносекундной накачке уширены по сравнению с линиями в спектрах, полученных при накачке импульсами пикосекундной длительности. Это обусловлено существованием нескольких актов лазерной генерации в течение каждого импульса накачки и существованием большого числа спектрально перекрывающихся мод.

Апробация работы

По результатам диссертационной работы опубликовано 14 работ: 7 статей в журналах и 7 публикаций докладов на международных конференциях.

Результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях, симпозиумах и научных конкурсах, где получали одобрительные отзывы:

1. ICONO/LAT'05, Россия, Санкт-Петербург, май 2005.
2. SPIE Optics&Photonics США, Калифорния, Сан-Диего, август 2005
3. CAOL/LFNM/РОЕМ'05, Украина, Ялта, сентябрь 2005
4. Конкурс молодых ученых им. И.В. Анисимкина, октябрь 2005
5. SPIE Optics&Photonics США, Калифорния, Сан-Диего, август 2006
6. Конкурс молодых ученых им. И.В. Анисимкина, октябрь 2006
7. ICONO/LAT'07, Белоруссия, Минск, май 2007.
8. OSA Photonic Metamaterials: From Random to Periodic, США, Джэксон Холл

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы.

Работа изложена на 97 страницах, содержит 82 рисунка и 1 таблицу. Список литературы включает в себя 71 наименование на 7 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и определены основные задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, указаны научная новизна и практическая ценность работы.

Первая глава посвящена обзору литературы по исследованиям лазерной генерации в случайно-неоднородных средах. Проведен исторический обзор, в котором изложена суть первых теоретических предсказаний и кратко описаны теоретические представления о природе эффекта. Поскольку лазерный эффект в случайно-неоднородных средах на основе ZnO при фотовозбуждении импульсами

наносекундной длительности не был получен ранее, целью данной работы было: получение эффекта, проведение исследований и предложение способов интерпретации особенностей этого эффекта.

Во второй главе описаны материалы и методы синтеза образцов случайно-неоднородных структур на основе ZnO, обоснованы методы исследования и описаны различные конфигурации созданной экспериментальной установки по измерению лазерных спектров.

Кроме того, во второй главе приведены предварительные результаты измерений, демонстрирующие наличие эффекта лазерной генерации. При регистрации излучения с помощью фотоумножителя было обнаружено, что лазерные спектры представляют собой многообразие очень узких, хаотично появляющихся спектральных линий. Пример такого спектра представлен на Рис. 1. Хаотичный характер лазерного эффекта, т.е. нерегулярное появление и исчезновение от импульса к импульсу интенсивного излучения на фиксированной длине волны был обнаружен нами на всех генерирующих образцах.

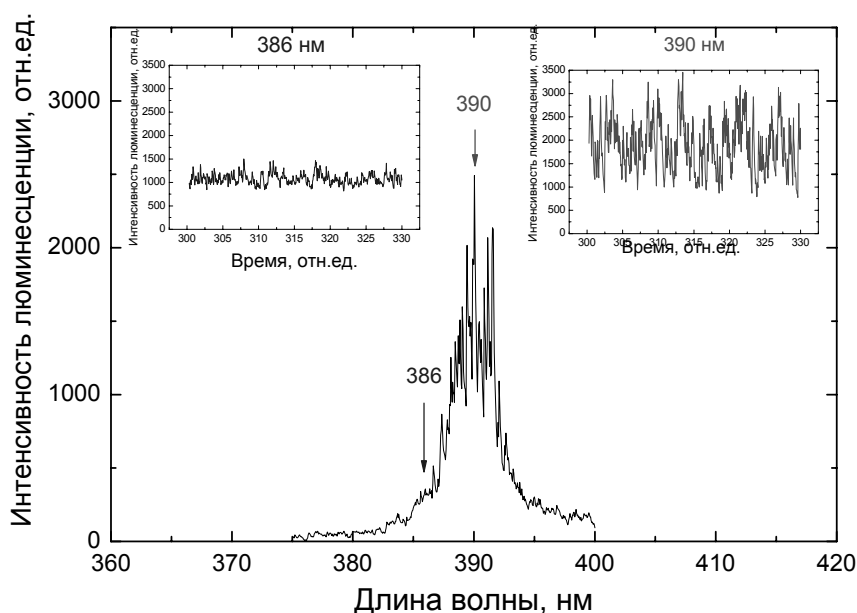


Рис. 1. Лазерные спектры, зарегистрированные с помощью ФЭУ: на вставках — поведение сигнала во времени на фиксированной длине волны

Обнаружено, что пороговая плотность энергии при наносекундной накачке, значительно больше, чем порог при пикосекундной накачке. Так при пикосекундной длительности накачки порог возбуждения генерации обычно не превышает 200 мкДж/см^2 , а в наших экспериментах при приблизительно такой же площади пятна накачки ($\sim 9 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$) значения порогов возбуждения лежат в области $2.7 - 27 \text{ мДж/см}^2$. Возможно, здесь играет роль не только короткое время жизни экситонов, но и участие в лазерном эффекте рекомбинационного излучения электронно-дырочной плазмы, время жизни которого еще короче.

Как уже отмечено, исследованные образцы отличаются друг от друга величиной пороговой плотности энергии накачки. Скорее всего, это следствие различия морфологии частиц разных образцов порошков. В образцах с высоким значением порога генерации, а также в образцах, в которых не было обнаружено лазерного эффекта, нет частиц с хорошо видимыми четкими гранями. Такие частицы присутствуют в образцах со сравнительно низким значением пороговой плотности энергии. Наличие четких граней свидетельствует об удовлетворительной кристалличности частиц порошка. В таких порошках наблюдается сравнительно низкий порог начала сужения линии, который мы рассматриваем как проявление усиленного спонтанного излучения. В лазерных спектрах этих образцов усиленное спонтанное излучение образует пьедестал, на котором в области максимума полосы излучения возникают узкие линии, что указывает на существование резонансной обратной связи. Исследованные образцы отличаются по характеру лазерных спектров – по соотношению пьедестала и узких линий. По нашему мнению, такая форма спектров отражает соотношение вкладов резонансной и нерезонансной обратной связи в лазерную генерацию.

В третьей главе приведены результаты основных экспериментов. Чтобы выяснить происхождение хаотического поведения спектров, продемонстрированного во второй главе, мы перешли к регистрации лазерных спектров, обусловленных отдельным импульсом накачки. Для этого была использована ПЗС камера Видеоскан-285.

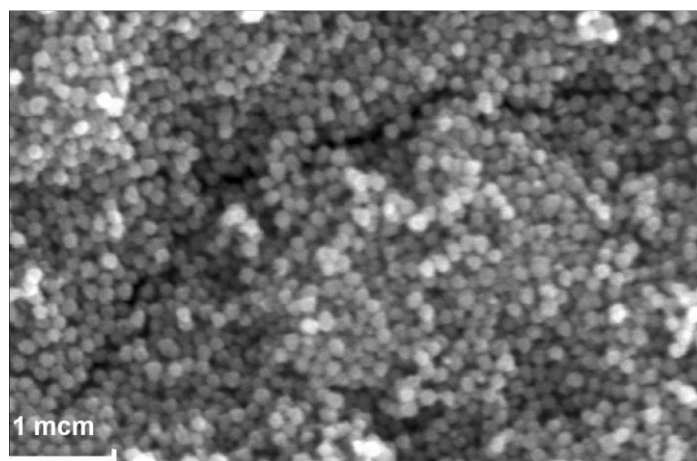


Рис. 2. Микрофотография образца монодисперсного порошка (USA3).

Обнаружено, что по сравнению со спектрами других образцов, лазерные спектры образца монодисперсного порошка ZnO USA3 (Рис. 2) были наиболее стабильны, но даже эти спектры демонстрировали случайные изменения от вспышки к вспышке, как по длине волны, так и по соотношению интенсивностей линий. Примеры этих спектров для двух различных мест возбуждения образца приведены на Рис. 3.

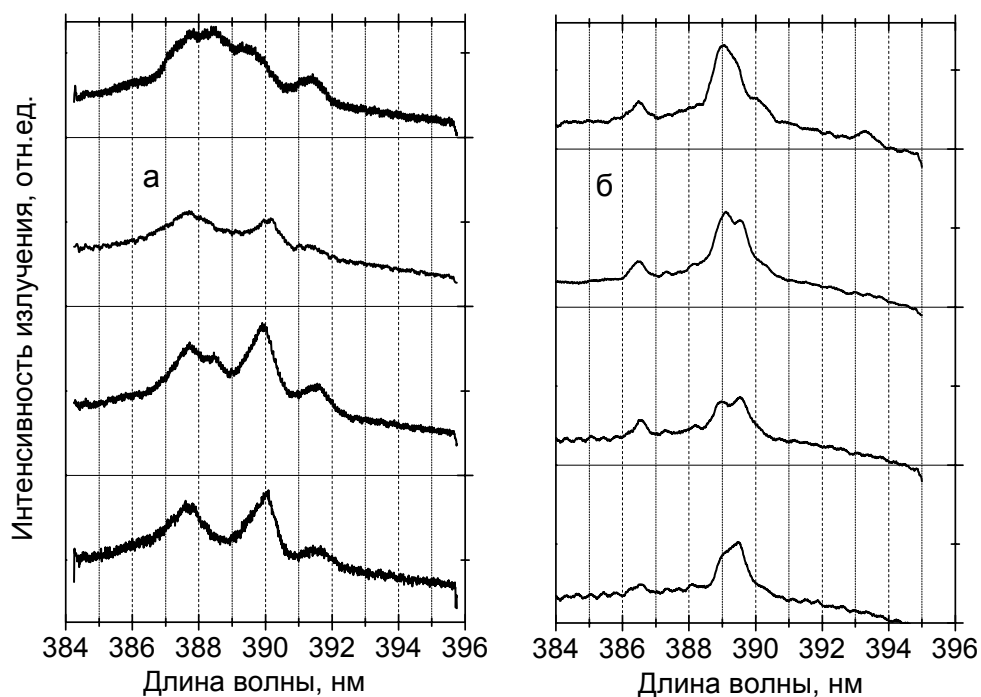


Рис. 3. Примеры лазерных спектров образца USA 3:
а, б – для разных мест возбуждения образца

Для того чтобы проанализировать нестабильность спектров от вспышки к вспышке, был выбран следующий подход:

- для набора записанных спектров определялись значения длин волн линий и их интенсивность по отношению к наиболее интенсивному пику рассматриваемого спектра;
- затем весь рассматриваемый спектральный интервал разделялся на равные части по ~ 0.17 нм и считалась сумма относительных интенсивностей пиков, попадающих в каждую часть.
- Спектральная зависимость сумм относительных интенсивностей, «статистический спектр», по нашему мнению, характеризует набор мод, существующих у данного конкретного образца, возбуждаемого в определенном его месте.

На Рис. 4а представлен подобный «статистический спектр» (сумма относительных интенсивностей пиков) для монодисперсного порошка. Для сравнения представлена обычная гистограмма (вероятность попадания пика в конкретный спектральный интервал) с тем же шагом дискретизации ~ 0.17 нм. На Рис. 4 видно, что «статистический спектр» состоит из нескольких неперекрывающихся мод с разной добротностью. Наиболее интенсивная мода находится на ~ 389.2 нм. Некоторые другие моды, появляющиеся примерно с той же частотой, имеют существенно меньшую интенсивность. Частично это может быть результатом меньшего усиления, но наблюдаемый скачок интенсивности существенно больше, чем спад полосы люминесценции. Поэтому логично сделать вывод, что наиболее добротная мода соответствует $\lambda \approx 389.2$ нм, а остальные моды менее добротны.

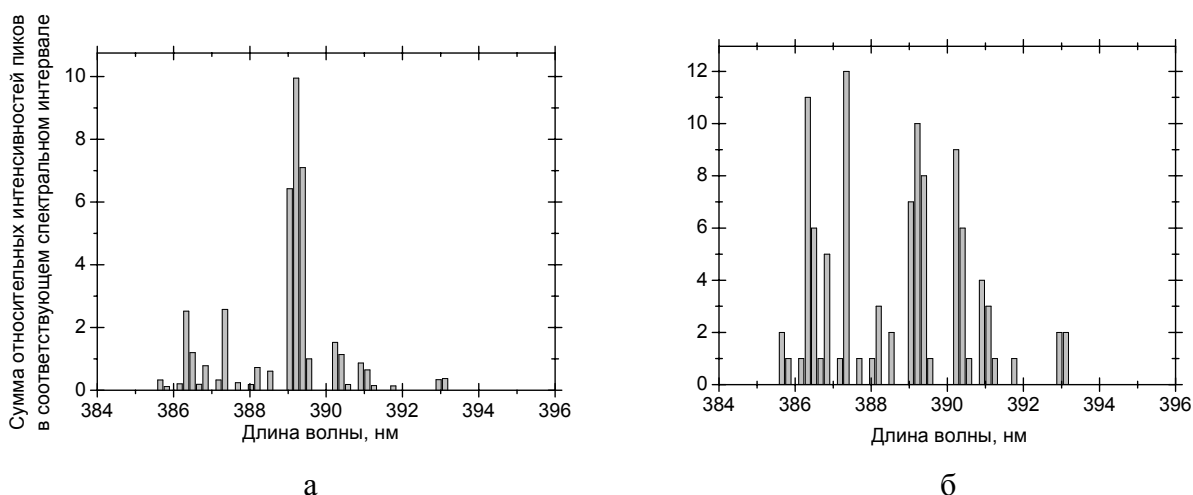


Рис. 4. а – Спектр сумм относительных интенсивностей пиков для образца USA3, б – соответствующая гистограмма.

Кроме образца монодисперсного порошка было исследовано большое количество образцов полидисперсных порошков. Спектры некоторых из них (с размерами частиц 0.2...2.0 мкм) часто представляли собой полосу с шириной 2 – 3 нм. Положение максимумов и ширины этих полос изменялись от вспышки к вспышке случайным образом. Это свидетельствует о том, что они не могут быть обусловлены усиленным спонтанным излучением. По нашему мнению, такие спектры представляют собой наборы перекрывающихся по частоте лазерных мод.

В ряде исследованных полидисперсных образцов наблюдались лазерные спектры с хорошо разрешенными линиями. Ширины этих линий (0.5 – 0.8 нм), как правило, были заметно больше, чем те, которые регистрировались при пикосекундной накачке (0.2 – 0.3 нм). Однако было несколько образцов, в спектрах которых наряду с широкими присутствовали и узкие линии. Пример такого лазерного спектра, полученного на образце SZ5 (Рис. 5), представлен на Рис. 6 – ширина узкой линии составляет ~ 0.2 нм, что близко к типичным результатам, получаемым при пикосекундной накачке. На Рис. 7 представлены «статистический спектр» (сумма относительных интенсивностей пиков) и гистограмма для образца SZ5.

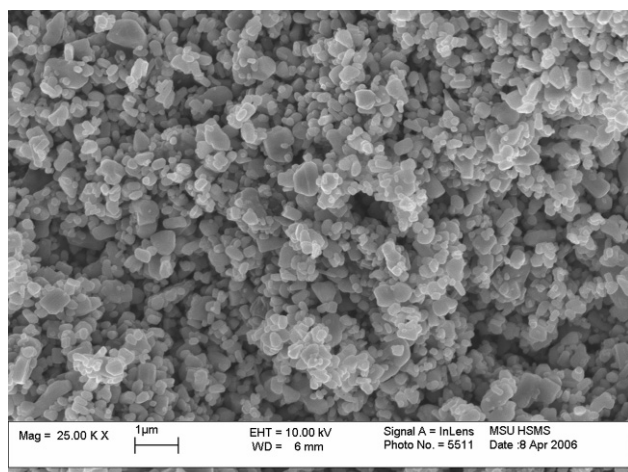


Рис. 5. Микрофотография образца SZ5

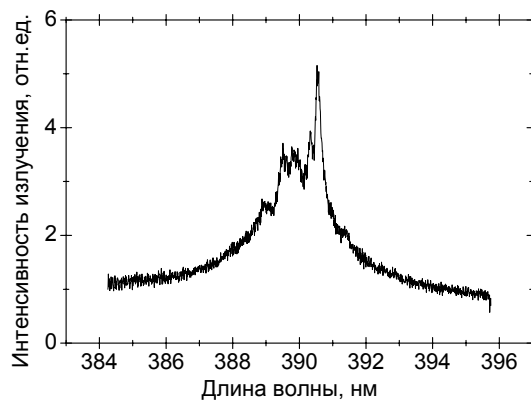
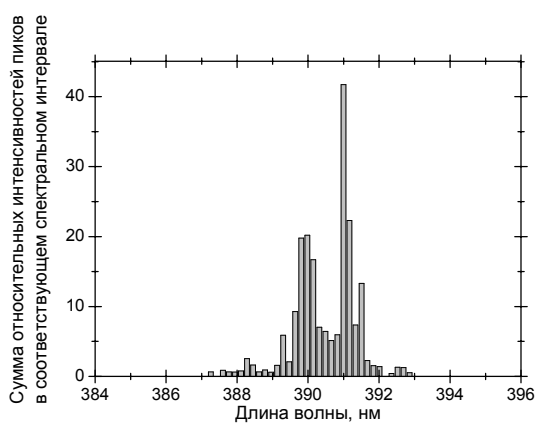
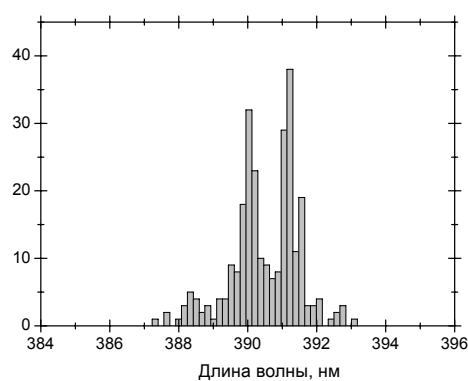


Рис. 6. Лазерный спектр образца SZ5



а



б

Рис. 7 а – Спектр сумм относительных интенсивностей пиков для образца SZ5, б-соответствующая гистограмма.

В проведенных экспериментах с наносекундной накачкой при относительно большом размере пятна накачки в спектрах лазерного излучения порошков и неупорядоченных пленок были обнаружены следующие факты и интересные особенности:

1) как правило, ширины линий существенно больше, чем при пикосекундной накачке. Одновременное существование в лазерных спектрах широких и узких линий говорит о том, что нагрев вряд ли может быть причиной уширения линий при наносекундной накачке, по сравнению со спектрами, полученными при накачке импульсами пикосекундной длительности. Вероятно, это обусловлено наличием нескольких актов лазерной генерации в течение каждого импульса накачки, что возможно, т.к. время жизни рекомбинационного излучения экситонов в

оксиде цинка (<200 пс) существенно короче длительности импульса накачки (~ 10 нс). Отдельные акты генерации происходят в разные моменты времени и обусловлены разными спектрально близкорасположенными лазерными модами. Длины волн генерации и ширины линий в этих актах соответствуют модам, существующим в среде, и могут перекрываться как спектрально, так и пространственно.

Относительно большой размер пятна накачки также обеспечивает существование многих спектрально близких мод. Кроме того, весьма вероятно, что длины волн некоторых линий изменяются в течение каждого акта генерации.

Сравнение «статистических спектров» моно- и полидисперсных порошков свидетельствует о том, что количество мод в полидисперсных порошках значительно больше, чем в монодисперсных, кроме того, они спектрально перекрывают друг друга, что опять же ведет к уширению линий.

2) Лазерные спектры случайным образом изменяются от вспышки к вспышке лазера накачки.

Задача выяснения происхождения случайного изменения лазерных спектров от импульса к импульсу накачки достаточно сложна. Можно было бы предположить, что случайные изменения лазерных спектров от вспышки к вспышке обусловлены изменениями распределения интенсивности в пятне накачки. Проверка показала, что в нашей системе распределение интенсивности накачки постоянно, хотя общая интенсивность излучения лазера накачки заметно изменяется, что продемонстрировано во второй главе.

Сглаженность и случайные вариации измеренных лазерных спектров не только в случае порошкообразных образцов, но и в образцах неупорядоченных пленок свидетельствуют о том, что эти эффекты не являются следствием движения гранул порошка под действием импульсов накачки.

Одной из возможных причин случайного изменения спектров может быть случайность числа спонтанных фотонов, участвующих в формировании лазерного излучения каждой моды. Чтобы оценить роль такого эффекта, в четвертой главе проводится моделирование временного хода процесса лазерной генерации с ис-

пользованием укороченных уравнений Максвелла для электромагнитного поля рассматриваемой моды и квантового уравнения Лиувилля для соответствующей поляризации среды.

Ясно, что число таких «затравочных» фотонов величина случайная. В четвертой главе оценено среднее значение числа таких фотонов в условиях нашего эксперимента. Оценка показывает, что среднее число «затравочных» фотонов для фиксированной моды мало. Поэтому флуктуации этого числа могут быть весьма велики. Чтобы оценить насколько эти флуктуации влияют на соотношение интенсивностей разных мод в лазерном спектре, была использована вышеупомянутая модель временного хода генерации.

Проведенные вычисления показывают, что, по крайней мере, частично, вариации лазерных спектров в порошке ZnO возникают из-за флуктуаций числа фотонов спонтанного излучения. Из этих вычислений следует, что, если моды пространственно не перекрываются, флуктуации числа спонтанных фотонов, которые служат «затравкой» для возникновения генерации, играют существенную роль только при слабой накачке, ниже порога генерации. При большой накачке такие флуктуации несущественны. Однако если имеет место пространственное перекрытие мод, и разные моды работают, хотя бы частично, за счет одних и тех же источников излучения, роль флуктуаций числа спонтанных фотонов становится весьма существенной. Возможно, качественно этот же механизм может объяснить и различия в вариациях спектров моно- и полидисперсных порошков, т.к. в порошках первого типа мы наблюдали меньшее число мод, чем в порошках второго типа. Соответственно, вероятность пространственного перекрытия мод в монодисперсном порошке должна быть меньше, чем может объясняться относительная стабильность лазерных спектров такого порошка.

В заключении сформулированы результаты диссертационной работы.

ВЫВОДЫ

Основная цель данной работы сводилась к получению и исследованию лазерного эффекта в случайно-неоднородных средах на основе ZnO при наносекундной накачке. Эта задача была выполнена: впервые при фотовозбуждении импульсами наносекундной длительности получен лазерный эффект на ряде образцов порошков и столбчатых пленок ZnO и обнаружены следующие особенности:

1. Порог возникновения и характер лазерной генерации зависят от морфологии порошков.
2. Анализ спектров моно- и полидисперсных порошков свидетельствует о том, что количество мод в полидисперсных порошках значительно больше, чем в монодисперсных, кроме того, эти моды спектрально перекрываются, что может приводить к уширению линий.
3. Экспериментально обнаружено, что лазерные спектры случайным образом существенно изменяются от вспышки к вспышке лазера накачки. Предположено, что одной из возможных причин наблюдаемого эффекта является случайное изменение числа спонтанных фотонов, участвующих в формировании лазерного излучения каждой моды. Для проверки справедливости этого предположения проведено моделирование временного хода процесса лазерной генерации.
4. В результате численного моделирования показано, что при наличии пространственного перекрытия мод вариации лазерных спектров в порошке ZnO происходят из-за флуктуаций числа спонтанных фотонов. Это может качественно объяснить обнаруженное различие характера флуктуаций спектров моно- и полидисперсных порошков. Действительно, поскольку количество мод в монодисперсном порошке меньше, вероятность их пространственного перекрытия должна быть меньше, чем в полидисперсном порошке. Соответственно роль флуктуаций числа спонтанных фотонов и степень случайности спектров могут быть меньше.
5. Обнаружено уширение линий лазерных спектров неупорядоченных структур на основе ZnO при наносекундной накачке по сравнению шириной линий при накачке импульсами пикосекундной длительности. Предположено, что это обусловлено наличием нескольких актов лазерной генерации в течение каждого импульса

накачки. Отдельные акты генерации происходят в разные моменты времени и обусловлены различными, но близкими по длинам волн лазерными модами.

СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Брискина Ч.М., Рыжков М.В., Маркушев В.М. Анализ собственных мод случайных и упорядоченных сред упрощенным способом // Радиотехника и Электроника. – 2006. – Т.51, №5. – С. 552. – 560.
2. Рыжков М.В. Спектры случайных лазеров при наносекундной накачке // Нелинейный мир. – 2007. – Т.5, №5. – С. 324. – 325.
3. Рыжков М.В. Исследование случайного лазера (random laser) на основе оксида цинка // Нелинейный мир. – 2006. – Т.4, №6. – С. 313. – 314.
4. Markushev V.M., Ryzhkov M.V., Briskina Ch.M. Characteristic properties of ZnO random lasers pumped by nanosecond pulses // Appl. Phys. B. – 2006. – Т.84. – С. 333. – 337.
5. Маркушев В.М., Рыжков М.В., Брискина Ч.М. Спектры случайных лазеров на ZnO при наносекундной накачке // Квантовая Электроника. – 2007. – Т.37, №9. – С. 837. – 840.
6. Markushev V.M., Ryzhkov M.V., Briskina Ch.M., Cao H., Zadorozhnaya L.A., Givargisov E.I., Zhong H., Lu W. и Wang S.-W. ZnO random laser spectra under nanosecond pumping // Laser Physics. – 2007. – Т.17, №9. – С. 1109. – 1118.
7. Markushev V.M., Ryzhkov M.V., Briskina Ch.M., Cao H. UV Radiation of Powdered ZnO Pumped by Nanosecond Pulses // Laser Physics. – 2005. – Т.15, №12. – С. 1611. – 1616.
8. Markushev V.M., Ryzhkov M.V., Briskina Ch.M., Cao H., Zhong H., Wang S.-W., Lu W. Analysis of ZnO Random Laser Spectra under Nanosecond Pumping // Proc. of SPIE. – 2007. – Т. 6731. – С. 67311M-1.
9. Markushev V.M., Ryzhkov M.V., Briskina Ch.M., Cao H. Spectra of ZnO random lasers under nanosecond pumping // Proc. of SPIE. – 2006. – Т. 6320. – С. 63200B.
10. Briskina Ch.M., Ryzhkov M.V. Eigenmodes analysis in two-dimensional random media // Proc. of SPIE. – 2005. – Т. 5924. – С. 59240Y.

11. Markushev V.M., Ryzhkov M.V., Briskina Ch.M., Cao H., Zadorozhnaya L.A., Li L.E., Gevargizov E.I., Demianets L.N. UV radiation of powdered ZnO pumped by nanosecond pulses // Proc. of SPIE. – 2005. – T. 5924. – C. 59240Z.
12. Markushev V.M., Ryzhkov M.V., Briskina Ch.M., Cao H., Zadorozhnaya L.A., Li L.E., Gevargizov E.I., Demianets L.N. Powdered zinc oxide as a source of stimulated UV radiation // Proc. of SPIE. – 2005. – T. 6054. – C. 6054G.
13. Briskina Ch.M., Ryzhkov M.V. Simplified method of numerical simulation of eigenmodes in random media // Proc. of SPIE. – 2005. – T. 6054. – C. 6054X.
14. Briskina Ch.M., Ryzhkov M.V. Study of physical origin of a resonant feedback in random lasers // Proc. of SPIE. – 2004. – T. 5508. – C. 285-291.