

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова

Российской академии наук

член-корр. РАН / С.А. Никитов /

» _____ 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Нефедкина Н.Е. "Коллективная динамика двухуровневых атомов в устройствах нанооптики и плазмоники", представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности: 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

В диссертации Н.Е. Нефедкина рассматривается круг актуальных задач современной электродинамики, относящихся к областям квантовой плазмоники, нанофотоники и квантовой оптики. Интенсивное развитие этих областей связано с необходимостью миниатюризации устройств, увеличения скорости их взаимодействия, в частности, скорости передачи информации и повышения их энергоэффективности. Поставленные задачи можно выполнить при помощи использования субволновых металлических плазмонных структур в качестве резонатора, в который помещена активная среда. Небольшой размер структур позволяет размещать их на чипе, а малый объем локализованных мод дает высокий фактор Парселла, а значит быстрое излучение, которое необходимо и для оптоэлектронных приложений, и для создания однофотонных источников. В диссертационной работе исследуются коллективные эффекты, возникающие в плазмонных устройствах, которые позволяют увеличить их быстродействие, точность и уменьшить влияние шумов. Таким образом, задачи, решенные в диссертации Н.Е. Нефедкиным, безусловно, являются актуальными.

Для практических применений плазмонных устройств необходимо глубокое понимание коллективных процессов, обусловленных взаимодействием атомов активной среды с электромагнитным полем металлических структур. Это взаимодействие приводит появлению ряда новых эффектов, которые могут оказывать как положительное, так и

отрицательное влияние на работу устройств. Поэтому исследованная в диссертационной работе коллективная динамика двухуровневых атомов важна для проектирования устройств нанофотоники и плазмоники.

Во введении обсуждаются актуальность и новизна результатов, их достоверность и практическая ценность, цели исследования, положения, выносимые на защиту, приведены публикации по теме диссертации.

В первой главе диссертации приводится обзор вспомогательных результатов по теме работы. Выведено управляющее уравнение на матрицу плотности в форме Линдблада для описания явления сверхизлучения. Продемонстрирован метод учета каналов диссипации в открытых квантовых системах. Дан вывод обобщенных скоростных уравнений, описывающих динамику числа фотонов в модах электромагнитного поля металлической структуры, инверсию населенностей атомов активной среды и энергетические потоки между разными модами через активную среду.

Вторая глава посвящена исследованию механизма сверхизлучения в системах классических и квантовых излучателей. В первом разделе главы изучается сверхизлучение в субволновой системе классических излучателей. Показано, что сверхизлучение возникает из-за конструктивной интерференции медленных огибающих быстрых осцилляций в некоторый момент в процессе эволюции, когда из-за нелинейности системы формируется точка сгущения фаз. Во втором разделе исследуется квантовая система двухуровневых атомов и процесс возникновения в ней сверхизлучения. Показано, что для квантовой системы существует единый механизм сверхизлучения, аналогичный механизму в классической системе, для различных типов состояний, а именно Дике с нулевым дипольным моментом и состояний, для которых полный дипольный момент не равен нулю. Также введен оператор косинуса фазы для квантового состояния и показано, что механизм возникновения сверхизлучения связан с уменьшением дисперсии разности косинусов фаз различных эмиттеров. Всплеск сверхизлучения возникает, когда дисперсия достигает своего минимального значения. В третьем разделе главы рассматривается динамика двухуровневых атомов, взаимодействующих с модой электромагнитного поля в резонаторе. Показано, что существует критическое значение скорости затухания, при котором интенсивность излучения зависит квадратично от числа атомов.

Третья глава диссертации посвящена исследованию нелинейных эффектов и нестационарных процессов в двумерных плазмонных лазерах с

распределённой обратной связью. В главе изучается двумерный плазмонный лазер с распределённой обратной связью, состоящий из золотой плёнки, перфорированной массивом отверстий, и активной среды. Рассматриваются режимы постоянной и импульсной накачки. В первом разделе обнаружен новый эффект, возникающий в двумерных лазерах с распределённой обратной связью, названный модовой кооперацией. Эффект заключается в том, что возбуждаются не темные моды с низкими потерями на границе запрещенной зоны, а светлые моды с высокими потерями из разрешенной зоны. Кооперация мод приводит к уширению диаграммы направленности излучения и к возникновению радиальной поляризации у излучаемого поля. Во втором разделе изучается временной отклик плазмонного лазера с распределённой обратной связью на внешний импульс накачки в зависимости от размера пятна накачки. Показано, что существует оптимальный диаметр накачиваемой области, для которого время отклика лазера на импульс накачки минимально и составляет 1 пикосекунду.

В четвертой главе исследуются когерентные свойства излучения плазмонных и нанооптических систем, функции когерентности первого и второго порядков. В первом разделе главы показано, что на линии компенсации потерь у спазера под воздействием внешней электромагнитной волны проявляется сужение линии фазовых флуктуаций дипольного момента и стохастический резонанс. Во втором разделе показано, что плазмонная наноантенна является хорошим кандидатом для увеличения скорости излучения однофотонных источников при сохранении статистических свойств излучения. Для этого необходимо сильное взаимодействие между антенной и источником, а также низкая температура антенны.

В диссертации содержится ряд новых результатов, а именно

1. Продемонстрировано, что в процессе эволюции системы классических нелинейных и квантовых излучателей в некоторый момент из-за нелинейности формируется точка сгущения фазовых траекторий дипольных моментов излучателей, в которой возникает сверхизлучательный пик. В точке сгущения фаз дисперсия фаз дипольных моментов классических эмиттеров минимальна. В случае сверхизлучения Дике квантовых эмиттеров минимальна дисперсия оператора разности косинусов фаз любых двух эмиттеров.
2. Предсказано существование оптимальной добротности резонатора, для которой интенсивность сверхизлучения атомов максимальна.

3. Предсказано существование явления модовой кооперации в двумерных плазмонных лазерах с распределенной обратной связью, проявляющееся в генерации мод с большими излучательными потерями и высоким порогом.

4. Показано, что время отклика плазмонного лазера с распределенной обратной связью на внешний импульс сильно зависит от площади пятна накачки. Установлено, что существует его оптимальный размер, при котором частота амплитудной модуляции достигает 1 ТГц.

5. Показано, что у отклика плазмонного нанолазера на внешнее поле в режиме компенсации потерь наблюдается подавление шумов и сужение спектра фазовых флуктуаций.

6. Показано, что отношение энергии тепловых флуктуаций наноантенны к энергии взаимодействия наноантенны и однофотонного источника является управляющим параметром для статистических свойств излучения системы, состоящей из наноантенны, запитываемой однофотонным источником. В пределе малого отношения система демонстрирует однофотонные свойства.

Достоверность результатов подтверждается совпадением теоретических расчетов с результатами численного моделирования, а также публикациями в ведущих мировых журналах.

Результаты исследований, проведенных Н.Е. Нефедкиным, представляют несомненный практический интерес. Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в следующих организациях: МГУ им. М.В. Ломоносова, ФИ им. Лебедева РАН, Институт спектроскопии РАН и других институтах РАН и Министерства образования и науки РФ.

Недостатки диссертации:

1. Первый раздел четвертой главы перегружен техническими подробностями, связанными со свойствами шумов. Лучше их обсуждение убрать в приложения.

2. В диссертационной работе не совсем ясен способ нахождения собственных мод плазмонной структуры, лишь вскользь обозначены их основные свойства.

3. В работе рассматривается импульсная накачка DFB-лазера, однако исследуется только отклик на единичный импульс. При реализации устройства на основе рассмотренного лазера на практике предполагается использование последовательности импульсов, а отклик системы на несколько подряд идущих импульсов может заметно отличаться от исследованного в работе случая: может измениться частота амплитудной

модуляции (в меньшую сторону) из-за релаксационных процессов в активной среде.

Однако отмеченные недостатки не умаляют достоинств диссертации. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., ред. 01.10.2018г., а ее автор Н.Е. Нефедкин заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 – "Электрофизика, электрофизические установки".

Отзыв заслушан и одобрен на заседании научно-квалификационного семинара «Физика электронных процессов в низкоразмерных системах» Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН «19» сентября 2019 г., протокол № 149

Отзыв составлен к.ф.-м.н. О.В. Бутовым.

в.н.с. ИРЭ им.В.А. Котельникова РАН,
к.ф.-м.н.

О.В. Бутов

Председатель семинара,
зам.директора ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН
д.ф.-м.н.

С.В.Зайцев-Зотов

Ученый секретарь семинара,
с.н.с. ИРЭ им.В.А. Котельникова РАН,
к.ф.-м.н.

А.М.Смолович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова
Российской академии наук
Почтовый адрес: 125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
Контактный телефон: +7 (495) 629-35-74;
Интернет-сайт: <http://www.cplire.ru>, e-mail: ire@cplire.ru