

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**СТЕНОГРАММА**

заседания диссертационного совета Д 999.138.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук при участии  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13) от 30 октября 2019 г.  
(протокол № 3)

Защита диссертации **Нефедкина Никиты Евгеньевича**  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
**«Коллективная динамика двухуровневых атомов в устройствах  
нанооптики и плазмоники»**

Специальность 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 999.138.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук при участии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13)

Протокол № 3 от 30 октября 2019 г.

Диссертационный совет Д 999.138.02 утвержден в количестве 20 человек Приказом № 411/нк Министерства образования и науки РФ от 10.05.2017 г. На заседании присутствуют **18** человек, из них **17** докторов наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки. Кворум имеется.

**Председатель** – председатель диссертационного совета Д 999.138.02 академик РАН Лагарьков А.Н.

**Ученый секретарь** – ученый секретарь диссертационного совета Д 999.138.02 к.ф.-м.н. Кугель К.И.

1	Лагарьков А.Н.	академик РАН	01.04.13	Присутствует
2	Амиров Р.Х.	д.ф.-м.н.	01.04.13	Присутствует
3	Якубов И.Т.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.13	Отсутствует
4	Кугель К.И.	к.ф.-м.н.	01.04.13	Присутствует
5	Антонов А.С.	д.ф.-м.н.	01.04.13	Присутствует
6	Батенин В.М.	член-корр. РАН, профессор	01.04.13	Присутствует
7	Василяк Л.М.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.13	Присутствует
8	Виноградов А.П.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.13	Присутствует
9	Денщиков К.К.	д.т.н.	01.04.13	Присутствует
10	Жук А.З.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.13	Присутствует
11	Зейгарник В.А.	д.т.н.	01.04.13	Присутствует
12	Карпухин В.Т.	д.т.н.	01.04.13	Отсутствует
13	Кисель В.Н.	д.ф.-м.н., доцент	01.04.13	Присутствует
14	Лебедев Е.Ф.	д.т.н., профессор	01.04.13	Присутствует
15	Парфенов Ю.В.	д.т.н.	01.04.13	Присутствует
16	Пухов А.А.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.13	Присутствует
17	Рахманов А.Л.	д.ф.-м.н., профессор	01.04.13	Присутствует
18	Сон Э.Е.	академик РАН	01.04.13	Присутствует
19	Сарычев А.К.	д.ф.-м.н.	01.04.13	Присутствует
20	Федоренко А.И.	д.т.н.	01.04.13	Присутствует

## ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации **Нефедкина Никиты Евгеньевича** на тему «Коллективная динамика двухуровневых атомов в устройствах нанооптики и плазмоники». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки. Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московском физико-техническом институте (национальном исследовательском университете)» (141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.).

### **Научный руководитель:**

**Андрианов Евгений Сергеевич** – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник подразделения №70 Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА») (127055, г. Москва, ул. Суцевская, д. 22, <http://www.vniia.ru>, (499) 978-78-03).

### **Официальные оппоненты:**

**Капуткина Наталия Ефимовна** – гражданка РФ, д.ф.-м.н., профессор кафедры физической химии, Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (НИТУ МИСиС) Капуткина Наталия Ефимовна (Ленинский проспект, д. 4, 119049, г. Москва).

**Мелентьев Павел Николаевич** – гражданин РФ, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории лазерной спектроскопии Института спектроскопии РАН (108840 г. Москва, г.Троицк, ул. Физическая, 5).

### **Ведущая организация:**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук** (125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., профессор Капуткина Н.Е. и к.ф.-м.н. Мелентьев П.Н., научный руководитель Нефедкина Н.Е. к.ф.-м.н. Андрианов Е.С.

## СТЕНОГРАММА

### Председатель

Первая защита Нефедкина Никиты Евгеньевича – «Коллективная динамика двухуровневых атомов в устройствах нанооптики и плазмоники» на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 - Электрофизика и электрофизические установки. Ну, и я предоставляю слово ученому секретарю.

### Ученый секретарь

*(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).*

### Председатель

Тогда, если вопросов нет к Клименту Ильичу, предоставляется 20 минут, и мы заслушаем Нефедкина Никиту Евгеньевича. Прошу!

### Нефедкин Н.Е.

*Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Нефедкина Н.Е. прилагается).*

### Председатель

Спасибо. Вопросы, пожалуйста. Пожалуйста, Эдуард Евгеньевич.

### Сон Э.Е.

Спасибо за доклад. Вы как-то мало времени уделили постановкам задач. Поэтому у меня ряд вопросов, может быть, дилетантских есть. Первый вопрос такой: объясните, чем отличается сверхизлучение от режима свободной генерации?

### Нефедкин Н.Е.

Сверхизлучение – это спонтанное излучение. В начальный момент система дефазирована, а в процессе эволюции, за счет описанного мною эффекта, излучатели фазируются и происходит излучение системы. Но самое главное отличие – излучение не вынужденное, а спонтанное.

### Сон Э.Е.

Но это у вас сначала система возбужденная? В режиме свободной генерации, если атом генерирует, то он вызывает индуцированные переходы. Атомы находятся в когерентной фазе.

### Нефедкин Н.Е.

Но дело в том, что тут нет когерентной фазы. Это основное отличие.

### Сон Э.Е.

Хорошо. Второй вопрос такой. По математической постановке задач. В первой части вы решали... Какие задачи вы решали с точки зрения математики?

### Нефедкин Н.Е.

С точки зрения математики в первой части, посвященной сверхизлучению, решается система, предложенная Вайштейном. Система нелинейных осцилляторов, которые

взаимодействуют друг с другом посредством радиационного трения.

**Сон Э.Е.**

Это классическая задача?

**Нефедкин Н.Е.**

Это классическая задача. Динамика системы классических осцилляторов, например, электронов в циклотроне.

**Сон Э.Е.**

А по квантовым задачам?

**Нефедкин Н.Е.**

В следующем разделе решалась задача, состоящая из ансамбля двухуровневых атомов в субволновом объеме.

**Сон Э.Е.**

Вы там упомянули про матрицу плотности, про Линдблада.

**Нефедкин Н.Е.**

Да, если проделать весь путь от гамильтониана до уравнения на матрицу плотности через ряд приближений, то получим следующее уравнение, в которое входят коллективные операторы дипольного момента.

**Сон Э.Е.**

И последний вопрос. Говоря о сверхизлучении, это спонтанное излучение, но резонатор при этом не принимает участия, или все-таки есть влияние резонатора?

**Нефедкин Н.Е.**

Есть влияние резонатора на сверхизлучение. В последнем разделе второй главы показано, что атомы взаимодействуют с модой резонатора. Излучают они в моду резонатора.

**Сон Э.Е.**

Я вам приведу пример. В режиме свободной генерации генерация от резонатора вообще не зависит. Поэтому все эксперименты... Почему спонтанное отличается от индуцированного?

**Нефедкин Н.Е.**

Наиболее важный здесь момент – это начальная некоррелированность атомов. А процесс, когда атомы начинают фазироваться, сильно зависит от резонатора. От потерь в резонаторе. И поэтому можно подобрать такой резонатор, при котором этот процесс будет протекать наиболее эффективно.

**Сон Э.Е.**

Спасибо.

**Нефедкин Н.Е.**

Спасибо за вопросы.

**Председатель**

Еще вопросы?

**Ученый секретарь**

Технический вопрос. Что такое DFB? Какая расшифровка?

**Нефедкин Н.Е.**

Distributed feedback laser. Лазер с распределенной обратной связью.

**Председатель**

Так, пожалуйста.

**Амиров Р.Х.**

Вы так исследуете явление накачки на отклик лазера. Там плотность мощности накачки согласуется при разных диаметрах? То есть меняется энергия.

**Нефедкин Н.Е.**

Да, конечно. В этом заключается один из побочных результатов: при оптимальном диаметре лазер не только излучает наиболее быстро, но и является наиболее энергоэффективным.

**Василяк Л.М.**

Можно еще вопрос, да?

**Председатель**

Пожалуйста.

**Василяк Л.М.**

Скажите, пожалуйста. Я, вот, тоже по сверхизлучению. Вот, азотный лазер, например. Без зеркал. Это типичное сверхизлучение. Но о пространственной и временной когерентности там никогда не говорится. А вот у вас, казалось бы, маленькие размеры, сравнимые, может быть, с длиной волны. Вы берете запутанное состояние, говорите, что оно потом стягивается. Генерацию показывали. И не наступает пространственной когеренции?

**Нефедкин Н.Е.**

О пространственной когеренции тут говорить не приходится вследствие субволновых размеров этой системы. Мы не рассматривали протяженные системы.

**Василяк Л.М.**

Она маленькая у вас. Казалось бы, она должна генерить в одной фазе.

**Нефедкин Н.Е.**

Фаза, изначально случайно распределенная, только в какой-то момент без внешней накачки стягивается, и происходит сверхизлучение. То есть фаза когерентна только в момент сверхизлучения.

**Василяк Л.М.**

То есть в момент сверхизлучения фаза когерентна. Да. Спасибо.

**Председатель**

Еще вопросы?

**Председатель**

Ну, у меня вопрос. Скажите, пожалуйста. Прозвучало утверждение, что все-таки удается компенсировать потери полностью за счет использования двухуровневой системы? Каким

образом? Действительно так, или это надежда?

**Нефедкин Н.Е.**

Теоретически это возможно. Что касается экспериментальных реализаций... Я сказать не готов.

**Председатель**

Но вам же необходимо, чтобы полностью было когерентно по отношению к падающему излучению. Без задержки, без всего. В фазе. Только в этом случае вы можете скомпенсировать и создать сверхразрешение. Только я не очень понимаю, как это сделать.

**Нефедкин Н.Е.**

В процессе возникновения эффекта компенсации. Компенсация потерь может подстраиваться под падающую волну, то есть если начинается...

**Председатель**

За такое маленькое время? Вам для подстройки нужно время. Внешнее излучение, оно же меняется: по фазе, по амплитуде. А у вас, чтобы подстроиться нужно время в любом случае. Поэтому я не понимаю, каким образом можно теоретически полностью скомпенсировать. Поняли вопрос?

**Нефедкин Н.Е.**

Кажется, что понял.

**Председатель**

Ну ладно, какие еще вопросы? Нет вопросов. Садитесь, пожалуйста.

**Ученый секретарь**

В деле имеется заключение организации, в которой выполнена диссертация.  
*Зачитывается заключение организации, на базе которой выполнена работа (не стенографируется, заключение прилагается)*

**Ученый секретарь**

Имеются отзывы на автореферат, с них и начнем. На автореферат поступило три отзыва из следующих организаций:

**1. д.ф.-м.н., профессор В.П. Крайнов** (МФТИ, Москва) – отзыв положительный, с замечаниями: – в тексте автореферата присутствуют неопределенные величины, что затрудняет его понимание; – чересчур сжатое изложение некоторых результатов. Например, из текста автореферата сложно понять, как именно зависит время задержки отклика плазмонного DFB лазера от размера накачиваемой области, формула (4).

**2. к.ф.-м.н., Ю.Е. Лозовик** (ИСАН, Троицк) – отзыв положительный, с замечаниями: – при обсуждении механизма возникновения сверхизлучения в квантовой системе не указана природа нелинейности; – непонятно, каким образом появляется неортогональность мод плазмонной структуры DFB лазера, ведь при разложении по базису моды ортогональны друг другу.

**3. д.ф.-м.н., профессор В.И. Манько** (ФИАН им. Лебедева, Москва) – отзыв положительный, с замечаниями: – при описании эффекта модовой кооперации ключевым моментом является существование неортогональных мод, но их природа в тексте

автореферата не обсуждается; – можно отметить некоторую специфичность используемой терминологии.

Все поступившие отзывы положительные.

### **Председатель**

Пожалуйста, ответьте на замечания.

### **Нефедкин Н.Е.**

Сначала отвечу на отзыв Крайнова В.П. Я согласен с первым замечанием. Что касается второго, то время задержки имеет хорошо знакомый по сверхизлучению вид, где  $N_a$  – это число возбужденных атомов активной среды. Очевидно, что число возбужденных атомов зависит от размера пятна накачки, и следовательно, от квадрата диаметра пятна, а константа взаимодействия обратно пропорциональна диаметру сформировавшейся коллективной моды. Таким образом, при малых диаметрах пятна время задержки растет с уменьшением диаметра как  $1/d$ , а при больших диаметрах – растет логарифмически. То есть существует оптимум.

Что касается отзыва Ю.Е. Лозовика. Нелинейность в квантовой системе – результат насыщения инверсии населенностей атомов. Неортогональность же мод возникает из-за конечности пятна накачки. То есть изначально разложение происходит по всей пленке, и моды, если рассматривать всю структуру, ортогональны. Однако пятно накачки меньше размера всего DFB лазера, поэтому в его пределах моды неортогональны и могут конструктивно интерферировать.

На первый вопрос В.И. Манько я уже ответил, поэтому перейду сразу ко второму. Действительно, в автореферате присутствуют некоторые специфичные термины, и я согласен, что их можно было бы избежать.

### **Ученый секретарь**

Переходим к отзыву ведущей организации. Отзыв положительный. Ведущая организация – **Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук** (г. Москва), составленный ведущим научным сотрудником, к.ф.-м.н. О.В. Бутовым и утвержденным директором института, член-корр. РАН Никитовым С.А. (*Зачитывает отзыв, отзыв имеется в деле*)

### **Нефедкин Н.Е.**

Я частично согласен с замечанием, но в то же время думаю, что для понимания способа вычисления необходимо было указать свойства шумов. Второй вопрос. Поскольку собственные моды плазмонной структуры были найдены в экспериментах группы ван Экстера, то, дабы не перегружать текст диссертации, были даны ссылки на соответствующие работы. И последний вопрос. Я согласен с замечанием, что частота модуляции может измениться при рассмотрении серии импульсов накачки вследствие, например, насыщения активной среды. Однако в работе акцентировалось внимание на принципиальной возможности уменьшения времени отклика, поэтому рассмотрение было сфокусировано на одиночном импульсе.

### **Председатель**

Правильно я понимаю, что если бы у вас была последовательность импульсов и если бы они были достаточно близки, то для каждого изменилось бы просто начальное состояние? Да?

### **Нефедкин Н.Е.**

Да.

### **Ученый секретарь**

Что ж, тогда мы можем перейти к официальным оппонентам.

**Председатель**

Слово предоставляется официальному оппоненту Капуткиной Наталии Ефимовне.

**Капуткина Н.Е.**

*(Зачитывает отзыв, письменный отзыв имеется в деле).*

**Председатель**

Спасибо большое, Наталия Ефимовна, садитесь, пожалуйста.

**Ученый секретарь**

Может быть, вы сначала ответите на замечания первого оппонента, а потом мы перейдем ко второму.

**Председатель**

Пожалуйста.

**Нефедкин Н.Е.**

Что касается выкладок, то мне кажется, что упомянутые технические выкладки полезны с методологической точки зрения и являются необходимыми для лучшего понимания главы с оригинальными результатами. Второе замечание. Действительно, моделирование такой сложной системы, как DFB лазер является отдельной задачей. Учитывалось порядка 500 мод, к тому же система является жесткой. Но неожиданно оказалось, что с помощью достаточно простой неявной схемы Эйлера, можно получить численное решение задачи. В 3 главе импульсная накачка моделировалась начальным условием по следующей причине. В реальном эксперименте использовали фемтосекундную накачку, что на целых три порядка быстрее характерного времени отклика, поэтому это приближение достаточно обосновано.

Действительно, во втором разделе третьей главы ключевым моментом является формирование коллективной моды. О ее существовании можно судить по распределению поля, которое практически не меняется во времени. Основываясь на этом наблюдении, была построена аналитическая модель отклика плазмонного DFB лазера.

Спасибо.

**Председатель**

Спасибо большое. Так, предоставляется слово второму оппоненту кандидату физико-математических наук Мелентьеву Павлу Николаевичу, институт спектроскопии. Пожалуйста.

**Мелентьев П.Н.**

*(Зачитывает отзыв, письменный отзыв имеется в деле).*

**Председатель**

Спасибо. Пожалуйста, ответьте на вопросы.

**Нефедкин Н.Е.**

Спасибо за интересные вопросы. И что касается первого вопроса, который посвящен использованию молекул, квантовых точек в реальных экспериментах, а не двухуровневых атомов, то я могу обратить внимание на два момента. Во-первых, зачастую такие системы имеют два рабочих уровня, и поэтому при теоретическом описании достаточно использовать двухуровневые системы. И, во-вторых, действительно, например, молекулы имеют как линию поглощения, так и линию испускания, и эти линии в большинстве случаев не совпадают. Однако при большой дефазировке двухуровневая система неплохо описывает и этот случай. Получается, что верхний уровень становится существенно

размытым.

Следующий вопрос относительно однофотонного источника. Да, в аналитических вычислениях рассматривается предел малой накачки источника, поскольку при учете большей мощности накачки задача становится слишком сложной. Тем не менее, численно в диссертации было получено, что при больших мощностях может начинаться лазерование в системе, однако в подавляющем большинстве случаев система просто сгорает, не достигая этого режима. Также стоит отметить, что в экспериментах для наблюдения испускания одиночных фотонов в системе источник—наноантенна требуется режим малого насыщения.

В последующих пунктах я согласен с оппонентом.

### **Председатель**

Спасибо. Садитесь, пожалуйста.

### **Ученый секретарь**

Так, следует перейти к отзыву научного руководителя.

### **Председатель**

Евгений Сергеевич, пожалуйста.

### **Андрианов Е.С.**

*Зачитывает отзывы (выступление не стенографируется, письменный отзыв имеется в деле)*

### **Председатель**

Спасибо, спасибо! Так, мы почти что закончили формальную часть, и нам надо перейти к дискуссии. Кто хочет высказаться?

### **Сон Э.Е.**

Поскольку я задавал наибольшее количество вопросов, я хотел бы сказать. Во-первых, мы находимся на защите диссертации человека, который пережил реформу высшего образования. Не знаю, вы заметили? Он закончил Физтех в 2017 году, а сейчас 2019 год, то есть он проучился фактически 2 года в аспирантуре. Хотя когда он получит степень, когда пройдет защита, он будет еще два года учиться в аспирантуре. Потому что аспирантура сейчас – это ступень высшего образования. Но Физтех известен тем, что туда поступают молодые ребята с хорошими данными. То, что он начал работу на третьем курсе характеризует его, к тому же работа в области теоретической физики. Он представил ряд задач. Я бы не сказал, что все они связаны одной единой целью, но они ориентированы на практическое применение. Диссертацию я, безусловно, поддерживаю. Учитывая и высокий уровень опубликованных работ и отзывы на автореферат от таких признанных специалистов, как Ю.Е. Лозовика и В.П. Крайнова, я призываю членов совета проголосовать положительно!

### **Председатель**

Спасибо! Кто-нибудь хочет еще высказаться? Я вот что хочу сказать как председатель. Работа, действительно, хорошая. Изложена хорошо. И хорошо очень опубликована. Для кандидатской диссертации статьи в журналах такого уровня – это очень хорошо, с моей точки зрения. Поэтому у нас есть все основания, чтобы эту работу поддержать. Тогда заключительное слово соискателя.

### **Нефедкин Н.Е.**

Хочу поблагодарить научного руководителя, Евгения Сергеевича Андрианова, с которым я работаю с третьего курса, Александра Андреевича Зябловского, а также руководителей группы – Александра Александровича Пухова и Алексея Петровича Виноградова за

многие часы обсуждений. Также благодарю уважаемых членов совета. Спасибо, что пришли в такой непогожий день.

**Председатель**

Спасибо! Выбор счетной комиссии.

**Ученый секретарь**

Давайте так. А.С. Антонов, А.И. Федоренко и Л.М. Василяк.

**Председатель**

Кто за? Прошу голосовать. *(Счётная комиссия выбирается единогласно)*. Тогда прошу счётную комиссию приступить, а всех членов диссертационного совета проголосовать. *(Проводится процедура тайного голосования)*.

**Председатель**

Уважаемые члены Совета! Давайте послушаем результаты.

**Василяк Л.М.**

Комиссия подсчитала результаты голосования. Позвольте огласить протокол заседания комиссии. Состав диссертационного совета утвержден в количестве **20** человека. Дополнительно введены члены совета – **нет**. Присутствовало на заседании **18** членов совета, в том числе, докторов наук по профилю рассматриваемой специальности – **17**. Роздано бюллетеней – **18**, осталось не роздано – **2**, оказалось в урне бюллетеней – **17**.

Результаты голосования по вопросу о присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук Нефедкину Никите Евгеньевичу:

**за – 17, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.**

**Председатель**

Предлагается утвердить протокол счетной комиссии. Прошу голосовать. Кто за? Против нет? Воздержавшихся нет? *(Протокол счетной комиссии утвержден единогласно)*.

Переходим к обсуждению проекта заключения. Есть замечания, пожелания?

*(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения)*. Кто за заключение с замечаниями, которые были указаны? Кто против? Нет. Кто воздержался? Нет. Спасибо, принято единогласно.

*(Проект заключения принят единогласно)*.

Давайте поздравим с успешной защитой!

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 999.138.02  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ИНСТИТУТА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПРИ УЧАСТИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО  
ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 30.10.2019 протокол № 3

О присуждении Нефедкину Никите Евгеньевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Коллективная динамика двухуровневых атомов в устройствах нанооптики и плазмоники» в виде рукописи по специальности 01.04.13 - Электрофизика и электрофизические установки, принята к защите 21.08.2019г., протокол № 2, объединенным диссертационным советом Д 999.138.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики при участии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, <http://www.itae.ru/>, +7 (495) 484-23-83), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10.05.2017г. № 411/нк.

Соискатель Нефедкин Никита Евгеньевич 1993 года рождения, в 2017 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

В настоящее время является аспирантом Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)» (с 01.09.2017 по 31.08.2021).

Диссертация выполнена на кафедре электродинамики сложных систем и нанофотоники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)».

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Андрианов Евгений Сергеевич, старший научный сотрудник подразделения №70 Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА») (127055, г. Москва, ул. Сущевская, д. 22, <http://www.vniia.ru>, (499) 978-78-03).

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической химии, Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (НИТУ МИСиС) Капуткина Наталия Ефимовна;

- кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории лазерной спектроскопии Института спектроскопии РАН Мелентьев Павел Николаевич дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (г. Москва), в своем положительном заключении, составленном ведущим научным сотрудником, кандидатом физико-математических наук О.В. Бутовым, заслушанном и одобренном на семинаре «Физика электронных процессов в низкоразмерных системах» (подписанном председателем семинара д.ф.-м.н. С.В. Зайцевым-Зотовым и ученым секретарем семинара к.ф.-м.н. А.М. Смолвичем, а также утвержденном 19.09.2019 директором ИРЭ РАН член-корреспондентом РАН С.А. Никитовым), указала что 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.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также лабораториями, занимающимися экспериментальными исследованиями наноразмерных плазмонных систем, в частности, в следующих организациях: МГУ им. М.В. Ломоносова, ФИ им. Лебедева РАН, Институт спектроскопии РАН.

Соискатель имеет 7 статей по теме диссертации в реферируемых журналах из списка ВАК:

1. Superradiance of a subwavelength array of classical nonlinear emitters / N. E. Nefedkin [et al.] // *Optics Express*. — 2016. — Feb. 22. — Vol. 24, no. 4. — P. 3464. — URL: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-24-4-3464>.
2. Superradiance of non-Dicke states / N. E. Nefedkin [et al.] // *Optics Express*. — 2017. — Feb. 6. — Vol. 25, no. 3. — P. 2790. — URL: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-25-3-2790>.
3. Superradiance enhancement by bad-cavity resonator / N. E. Nefedkin [et al.] // *Laser Physics*. — 2017. — June 1. — Vol. 27, no. 6. — P. 065201. — URL: <http://stacks.iop.org/1555-6611/27/i=6/a=065201?key=crossref.fc4c5e9b9ed51a9ab720bd8c2449a771>.
4. Stochastic resonance in the loss compensation regime of a plasmonic nanolaser / N. E. Nefedkin [et al.] // *Physical Review A*. — 2017. — Sept. 1. — Vol. 96, no. 3. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.96.033801>.
5. Mode Cooperation in a Two-Dimensional Plasmonic Distributed-Feedback Laser / N. E. Nefedkin [et al.] // *ACS Photonics*. — 2018. — Aug. 15. — Vol. 5, no. 8. — P. 3031—3039. — URL: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsphotonics.8b00265>.
6. Response Time of a Plasmonic Distributed Feedback Laser in a Large-Signal Modulation Regime / N. Nefedkin [et al.] // *Phys. Rev. Applied*. — 2019. — May. — Vol. 11, issue 5. — P. 054067. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.11.054067>.
7. Second-order coherence function of a plasmonic nanoantenna fed by a single-photon source / N. E. Nefedkin [et al.] // *Opt. Express*. — 2019. — Aug. — Vol. 27, no. 16. — P. 23396—23407. — URL: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-27-16-23396>.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

**1. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)** (Профессор кафедры теоретической физики, д.ф.-м.н., В.П. Крайнов) –

отзыв положительный, со следующими замечаниями:

– в тексте автореферата присутствуют неопределенные величины, что затрудняет его понимание

– чересчур сжатое изложение некоторых результатов. Например, из текста автореферата сложно понять, как именно зависит время задержки отклика плазмонного DFB лазера от размера накачиваемой области, формула (4).

**2. Институт спектроскопии РАН** (Зав. лабораторией спектроскопии наноструктур, к.ф.-м.н. Ю.Е. Лозовик) – отзыв положительный, со следующими замечаниями:

– при обсуждении механизма возникновения сверхизлучения в квантовой системе не указана природа нелинейности

– непонятно, каким образом появляется неортогональность мод плазмонной структуры DFB лазера, ведь при разложении по базису моды ортогональны друг другу

**3. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН** (Главный научный сотрудник, д.ф.-м.н. В.И. Манько) – отзыв положительный, с замечаниями:

– при описании эффекта модовой кооперации ключевым моментом является существование неортогональных мод, но их природа в тексте автореферата не обсуждается

– можно отметить некоторую специфичность используемой терминологии

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что:

- д.ф.-м.н., Капуткина Н.Е. является ведущим ученым в области квантовой оптики, физики твердого тела; автор множества работ, посвященным различным эффектам, в том числе, лазерированию в гетероструктурах, таких как квантовые точки, квантовые ямы, и др.;

1. Altaisky, M. V., Zolnikova, N. N., Kaputkina, N. E., Krylov, V. A., Lozovik, Y. E., & Dattani, N. S. (2017). Entanglement in a quantum neural network based on quantum dots. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 24, 24-28.

2. Altaisky, M. V., Zolnikova, N. N., Kaputkina, N. E., Krylov, V. A., Lozovik, Y. E., & Dattani, N. S. (2016). Towards a feasible implementation of quantum neural networks using quantum dots. *Applied Physics Letters*, 108(10), 103108.

3. Altaisky, M. V., Kaputkina, N. E., & Krylov, V. A. (2018). Symmetry and decoherence-free subspaces in quantum neural networks. *Physics of Atomic Nuclei*, 81(6), 792-798.

- к.ф.-м.н. Мелентьев П.Н. является признанным специалистом по лазерной спектроскопии и спектроскопии плазмонных наноструктур. Автор многих работ по данной тематике:

1. P.N. Melentiev, A. Kalmykov, A. Kuzin, D. Negrov, V. Klimov, V.I. Balykin (2019). Open-Type SPP Waveguide with Ultrahigh Bandwidth up to 3.5 THz, *ACS Photonics* 6,1425-1433.

2. П.Н. Мелентьев, В.И. Балыкин (2019). Нанооптические элементы для поверхностных плазмонных волн. *УФН*, 189, 282–291.

3. Melentiev, P., Kalmykov, A., Gritchenko, A., Afanasiev, A., Balykin, V., Baburin, A.S., Ryzhova, E., Filippov, I., Rodionov, I.A., Nechepurenko, I.A., Dorofeenko, A.V., Ryzhikov, I., Vinogradov, A.P., Zyablovsky, A.A., Andrianov, E.S., Lisyansky, A.A. (2017). Plasmonic nanolaser for intracavity spectroscopy and sensorics. *Applied Physics Letters*, 111(21), 213104.

Выбор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН в качестве ведущей организации обоснован тем, что ИРЭ РАН является многопрофильной организацией, проводящей обширные исследования, в том числе в области электродинамики низкоразмерных наноструктур и распространения электромагнитных волн в сложных средах и структурах:

1. Polischuk O V, Moiseenko I M, Morozov M Y, Popov V V Double frequency plasmonic amplification of terahertz radiation in a periodical double-layer graphene. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1092. 012119. ISSN 1742-6588

2. Моисеенко И.М., Морозов М.Ю., Попов В.В. Усиление терагерцевых плазмонов в

экранированном графене с накачкой оптическими плазмонами. Нелинейный мир , 2018 , 16 (2). С. 7-8. ISSN ISSN 2070-0970

3. Pogosov W.V., Shapiro D.S., Bork L.V., Onishchenko A.I. Exact solution for the inhomogeneous Dicke model in the canonical ensemble: Thermodynamical limit and finite-size corrections. Nuclear Physics B, 2017, 919. С. 218-237. ISSN 05503213

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

1. Исследовано явление сверхизлучения в системах классических и квантовых эмиттеров. Найден общий для этих систем механизм возникновения сверхизлучательного всплеска интенсивности излучения. Определена оптимальная добротность резонатора, в который помещены эмиттеры, при которой интенсивность сверхизлучения максимальна.

2. Исследована коллективная динамика атомов активной среды и мод электромагнитного поля двумерного плазмонного DFB лазера. Предсказан эффект кооперации мод. Предложен метод генерации лазерных импульсов с терагерцовой частотой за счет изменения размера накачиваемой области активной среды.

3. Исследован отклик плазмонного нанолазера на внешнее электромагнитное поле при учете тепловых шумов. Показано, что в режиме компенсации потерь плазмонного нанолазера возникает стохастический резонанс, проявляющийся в подавлении случайных флуктуаций фазы дипольного момента нанолазера.

4. Изучено влияние плазмонной наноантенны, размещенной вблизи однофотонного источника, на интенсивность излучения системы наноантенна–однофотонный источник и статистические свойства излучения.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

1. Впервые 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, помещенных в этот резонатор, максимальна.

3. Впервые предсказано существование явления кооперации мод 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. Впервые 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.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается** тем, что:

– На основе предложенного механизма сверхизлучения разработаны рекомендации по увеличению его интенсивности при подборе оптимальной добротности резонатора.

