

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Парфеньева Владимира Михайловича «**Нелинейные явления в плазмонике и гидродинамике: теория спазера и генерация завихренности поверхностными волнами**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 “Теоретическая физика”

### **Актуальность темы**

Еще с конца 70-х - начала 80-х прошлого столетия стала понятна исключительная роль поверхностных мод для физики взаимодействия лазерного излучения с конденсированными средами. Достаточно упомянуть такие яркие эффекты как гигантское комбинационное рассеяние, усиление на многие порядки генерации второй гармоники и полное подавление металлического отражения при резонансном возбуждении поверхностных электромагнитных волн. В наше время с развитием нанofизики исследования поверхностных явлений вышло на новый уровень, свидетельством чему является открытие спазеров – квантовых генераторов, в которых роль резонатора играют наноразмерные металлические частицы. Исследования физики спазеров обещают интересные применения от информационных технологий до медицины. Наряду с оптикой, поверхностные явления важны и в гидродинамике. Здесь до недавнего времени не был известен механизм возбуждения вихрей поверхностными волнами. Раскрытие этого механизма существенно для физики приповерхностных течений и процессов переноса в океане.

Сказанное выше позволяет тему диссертации В.М. Парфеньева, посвященной разработке теории спазеров и решению родственных с ними нелинейных задач о явлениях на поверхности жидкости и в смектических кристаллах, считать актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

### **Новизна и наиболее интересные результаты**

В первой части диссертации, к которой относятся главы 1-3, разрабатывается теория спазеров. Имеется два существенных отличия нанолазеров от обычных лазеров. Первое - это малый в сравнении с длиной волны размер резонатора и второе - относительно низкая добротность. Именно они (главным образом, второе отличие) сделали неприменимыми существующие представления о квантовых генераторах к нанолазерам и привели к необходимости разработки новой теории.

В первой главе на основе уравнений Максвелла-Блоха была построена полуклассическая теория спазера. Здесь впервые дано объяснение тому, что с увеличением интенсивности накачки частота генерации может выйти за пределы интервала между частотой поверхностного плазмона и частотой резонансного перехода в активных атомах, что обусловлено деформацией лазирующей моды. Разработанный метод позволяет определять частоту генерации спазера в любой точке выше порога генерации.

Во второй главе проанализированы ограничения, которые накладываются на максимально допустимое число плазмонов, возбужденных в металлической наногрануле. Впервые установлено, что в стационарном режиме вследствие невысокой добротности плазмонного резонатора и ее зависимости от температуры в тепловой задаче возникает положительная обратная связь, благодаря чему наногранула уже при возбуждении всего нескольких плазмонов нагревается вплоть до своей температуры плавления. В импульсном режиме тепловые нагрузки отступают, а на первый план выходят ограничения, связанные с деформацией устройства пондеромоторными силами. Вместе с тем, как выяснилось, эти ограничения оказались довольно мягкими, так что допустимое число плазмонов в импульсном режиме работы спазера может составить сотни и даже тысячи квантов.

В третьей главе разработана квантовая теория плазмонного нанолазера с учетом низкой добротности плазмонного резонатора. Проанализирован вопрос о сужении спектральной линии. Проблема состоит в том, что вследствие малого числа плазмонов в резонаторе механизмом сужения спектральной линии спазера, работающего в стационарном режиме, не реализуется явление вынужденного излучения. Впервые установлено, что в этом случае сужение линии происходит за счет сохранения когерентности активных атомов, число которых велико. Исследованы также статистические свойства излучения спазера. Найдено явное выражение для корреляционной функции второго порядка  $g^{(2)}(\tau)$ . Показано, что выше порога генерации флуктуации амплитуды поляризации активных атомов приводят к затухающим со временем колебаниям в функции  $g^{(2)}(\tau)$ .

Во второй части диссертации (главы 4, 5) исследуются генерация вихрей в жидкости и в жидких кристаллах поверхностными волнами.

В четвертой главе впервые построена количественная теория недавно обнаруженного и исследованного экспериментально явления генерации вертикальной завихренности в жидкости поверхностными волнами в слабо нелинейном режиме. Интересно, что скорость вихревого движения на поверхности жидкости, связанная с

вертикальной завихренностью, не зависит от вязкости жидкости, хотя она и производится вследствие вязкого механизма. В этой главе было разработано количественное описание данного явления и сделан ряд предсказаний, часть из которых была подтверждена экспериментально.

В пятой главе проведено обобщение разработанной в предыдущей главе теории на случай генерации завихренности в смектических пленках, в которых возбуждены поперечные колебания. Были рассмотрены пленки, подвешенные в вакууме и воздухе. В обоих случаях поперечные колебания пленки могут приводить к образованию вихревого (соленоидального) течения на ее поверхности. Впервые получены явные выражения для завихренности в терминах отклонения пленки от равновесия. В случае вакуума генерируемая завихренность пропорциональна аномально малому затуханию изгибной моды. Показано, что воздух существенно влияет на динамику пленки и на механизм генерации завихренности.

#### ***Достоверность***

Достоверность результатов диссертации подтверждается тем, что они получены на основе современных методов теоретической физики, в ряде случаев подкреплены численными расчетами, а там, где возможно, и сравнением с экспериментом.

#### ***Практическая ценность***

Результаты диссертации, касающиеся механизмов работы спазера, полезны при проектировании экспериментов по нанолазерам, и являются необходимыми для успешного применения данного устройства в практических приложениях. Результаты по генерации завихренности поверхностными волнами могут быть использованы для анализа движения поверхности океана, а также для проектирования соленоидальных течений заданной формы на поверхности жидкости.

#### ***Недостаток***

Представленные в диссертации результаты приобрели бы дополнительную эвристическую ценность, если бы всегда строгим выводам предшествовали физически прозрачные качественные оценки. Это касается, например, сдвига частоты генерации спазера, обусловленного изменением структуры лазирующей моды.

#### ***Общая оценка***

Указанный недостаток не является принципиальным и никак не влияет на мою общую высокую оценку работы. Результаты, выносимые на защиту, являются новыми и оригинальными и носят фундаментальный характер. Несомненным достоинством работы является то, что во многих случаях аналитические результаты, как уже отмечалось,

подкрепляются численными расчетами. Особую ценность и убедительность придает анализ экспериментальных данных и сравнение теоретических выводов с экспериментом. Диссертация написана четким научным литературным языком.

Основные результаты с достаточной полнотой опубликованы в престижных научных журналах и представлены на международных конференциях.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Диссертация В.М. Парфеньева является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную тему. Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.02 и отрасли науки «физико-математические науки», отвечает критериям, предъявляемым к диссертационным исследованиям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02, соответствует требованиям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Парфеньев Владимир Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Заведующий лабораторией теоретической физики ИБРАЭ РАН

д.ф.-м.н., профессор



П.С. Кондратенко

115191, г. Москва, Большая Тульская ул., д. 52

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН

Телефон: 8(495) 955 2291

E-mail: kondrat@ibrae.ac.ru

Подпись д. ф.-м. н., проф. Кондратенко Петра Сергеевича заверяю:

Учёный секретарь ИБРАЭ РАН

к.т.н.

12 декабря 2016 г.



В.Е. Калантаров