

**УТВЕРЖДАЮ**

Временно исполняющий обязанности  
директора Федерального государственного  
бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской  
академии наук» (ИПФ РАН),  
доктор физико-математических наук  
член-корреспондент РАН

Г. Г. Денисов

" 11 " декабря 2017 г.

В диссертационный совет Д 002.110.02  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенный институт высоких температур РАН,  
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

## ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Быстрого Романа Григорьевича

«Динамика электронов в неидеальной кластерной наноплазме»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

Диссертация Быстрого Р. Г. посвящена теоретическому исследованию свойств наноразмерной плазмы, образующейся при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с атомными кластерами. Интерес к подобным исследованиям связан как с растущими экспериментальными возможностями реализации такого лазерно-кластерного взаимодействия и последующей диагностики наноразмерной плазмы, так и с различными приложениями наноразмерной плазмы (например, в биомедицинской диагностике и терапии, при разработке и использовании новых метаматериалов, для создания источников

заряженных частиц). К настоящему времени уже накоплен ряд экспериментальных результатов, которые остаются необъяснёнными или не до конца осмысленными. Это касается, например, особенностей спектра поляризационного отклика ионизированных кластеров при различных размерах кластеров и энергетических распределений электронов термоэмиссии. Таким образом, тема диссертации, выбранная Быстрым Р. Г., представляется, без сомнения, **актуальной**.

В диссертационной работе автором рассмотрен круг задач, касающихся характеристик электронной динамики в неидеальной наноразмерной плазме. В частности, это задача о нахождении линейного поляризационного отклика такой плазмы и исследовании её собственных колебаний. Другая задача связана с построением и верификацией модели термоэлектронной эмиссии из наноплазмы. Обе эти задачи важны для объяснения имеющихся экспериментальных результатов. Кроме того были рассчитаны спектры флуктуаций давления в такой неидеальной плазме и обсуждён фундаментальный вопрос о негауссовом характере этих флуктуаций. Все рассмотренные задачи представляют большой общефизический и практический интерес и объединены общностью используемого метода, основанного на численном моделировании в рамках молекулярно-динамического подхода. Тематика исследования, формулировка целей и задач исследования, используемые методы решения, область приложения исследования указывают, что представленная диссертационная работа **соответствует паспорту специальности 01.04.08 – физика плазмы**.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертация Быстрого Р. Г. состоит из введения, пяти глав (включая главу, содержащую обзор литературы), заключения и библиографии и изложена на 94 страницах, включая 20 рисунков. Библиография включает 76 наименований на 7 страницах.

Во введении даётся краткая характеристика диссертационной работы, определяются цели и задачи работы, аргументируются её актуальность, новизна, научная и практическая значимость, обосновывается выбор метода молекулярной динамики в качестве главного метода исследования.

Первая глава диссертации представляет собой обзор литературы в области исследований неидеальной плазмы, ионизированных атомных кластеров и применения метода молекулярной динамики (включая методы анализа результатов компьютерного моделирования).

Вторая глава описывает созданный программный комплекс для молекулярно-динамического моделирования неидеальной плазмы. Обоснован выбор ряда технических

решений. Например, использование графических ускорителей позволило на два порядка увеличить максимальное число частиц в кластере и исследовать размерные эффекты в широком диапазоне размеров кластеров. На тестовых примерах показано соответствие разработанной программы требованиям используемой математической модели в части производительности и точности.

Третья глава посвящена исследованию поляризационных свойств нанокластеров. Подробно описаны постановка задачи и примененные методы моделирования. Приведены результаты молекулярно-динамического расчёта спектра автокорреляционной функции тока, характеризующей поляризационный отклик кластера на различных частотах. На основе анализа этих спектров определены частоты собственных колебательных мод кластера и их констант затухания в зависимости от размера и плотности кластера. Обсуждено влияние неоднородности профиля электронной концентрации на спектр собственных частот и выведена аналитическая формула, связывающая частоту колебаний с формой профиля электронной концентрации.

В четвёртой главе исследована термоэлектронная эмиссия из наноплазмы. В этой главе на основе кинетического подхода построена простая модель термоэмиссии из сферически симметричного плазменного объекта. Модель описывается двумя обыкновенными дифференциальными уравнениями для тока эмиссии и уносимой этим током энергии. Проводится численное интегрирование уравнений полученной модели, и результаты расчёта сопоставляются с результатами молекулярно-динамических расчётов, проведённых самим автором и другими исследователями. Показано, что созданная модель достаточно хорошо описывает процесс термоэлектронной эмиссии на больших временах. Обсуждена возможная интерпретация имеющихся экспериментальных результатов по термоэлектронной эмиссии из кластерной плазмы с помощью построенной модели, дополненной уравнениями для расширения кластеров.

В пятой главе исследован вопрос о спектре флуктуаций давления в неидеальной плазме. Большое внимание уделено точности вычисления давления и его флуктуаций. Представлены рассчитанные на основе метода молекулярной динамики спектры колебаний давления. Показано, что флуктуации давления имеют негауссов характер фликкер-шума.

В заключении перечислены основные результаты работы.

**Новизна научных результатов.** Диссертационная работа Быстрого Р.Г. представляет собой цельное, обладающее новизной исследование в области физики неидеальной плазмы. Благодаря выбранным техническим решениям впервые с помощью

основывающегося на первых принципах метода молекулярной динамики были исследованы плазменные наноструктуры, содержащие сотни тысяч частиц. Получена новая формула для частоты электронных колебаний в плазменном шаре с неоднородным профилем электронной концентрации. Построена оригинальная модель термоэмиссии из наноразмерной плазмы. Новизна полученных результатов не вызывает сомнений, бесспорно, они привлекут внимание специалистов в данной области. Цитирование работ других авторов проведено корректно и достаточно полно.

**Достоверность** полученных результатов и **научная обоснованность** положений, рекомендаций и выводов диссертации обеспечивается физической аргументированностью и математической корректностью проводимых выкладок, обоснованностью принятых допущений и приближений. О **достоверности** результатов также свидетельствует хорошее согласие с результатами выполненных ранее экспериментов. Полученные в компьютерном моделировании результаты хорошо объясняются предложенными аналитическими зависимостями и не противоречат полученным ранее результатам других авторов. В предельных случаях достигаются хорошо известные теоретические зависимости.

**Научная и практическая значимость работы.** Диссертация развивает теоретические представления об оптических и эмиссионных свойствах наноплазмы. В частности, в работе предложена принципиально новая модель эмиссии с поверхности наноплазмы, и на ее основе дана новая трактовка известных экспериментальных данных. Полученные в диссертации результаты могут способствовать созданию новых энергоэкономичных и относительно недорогих методов генерации потоков заряженных частиц и рентгеновского излучения.

**Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов работы.** Результаты диссертационного исследования Быстрого Р. Г. могут быть рекомендованы для использования в Институте Общей Физики им. А.М. Прохорова РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Объединенном институте высоких температур РАН, Институте прикладной физики РАН, на физических факультетах институтов МГУ, СПбГУ, ТРИНИТИ, МФТИ и др.

Результаты диссертации **опубликованы** в 22 печатных работах, в том числе в 4 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых базой Web of Science. Диссертационная работа представляет собой завершённое исследование. Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание работы. **Оформление диссертации** отвечает требованиям ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

**По диссертации имеются следующие замечания.**

1. В параграфе 3.5 при выводе формулы (3.21), связывающей частоту плазменных колебаний и профиль электронной концентрации, автор делает предположение: «Основной длинноволновый режим соответствует движению электронного облака как твердого тела без деформации». Однако это утверждение является верным только для однородного профиля электронной концентрации. В случае неоднородных профилей, которые автор рассматривает в этом параграфе, возникающее при колебаниях электрическое поле также оказывается неоднородным, что приводит к периодической деформации электронного облака во время колебания. Утверждение автора, по всей видимости, можно считать приближённо верным только для профилей, которые близки к однородным, например, для профиля концентрации с широким плато и относительно тонким переходным слоем (слабо размытой границей). Автору следовало обсудить область применимости вышеупомянутого предположения. Также следовало указать, оказывается ли полученная формула применимой для профилей, получающихся в результате проведённого молекулярно-динамического моделирования.

2. В третьей главе приводятся результаты расчётов константы затухания для дипольной моды  $M_i$  в зависимости от размера кластера. Рассчитанные значения константы практически не зависят от размера кластера при малых размерах (рис. 3.5), что противоречит известному выражению (3.10) для этой константы. Автор, на наш взгляд, недостаточно убедительно разъясняет в тексте диссертации это несоответствие. Следовало бы более подробно остановиться на роли известных механизмов потерь в неоднородной ограниченной плазме (соударения с границей и резонансное поглощение в области критической плотности) и указать диапазон размеров кластеров, для которых применимы полученные результаты.

Сделанные замечания не снижают высокой оценки выполненных исследований и не ставят под сомнение достоверность и значимость полученных результатов, а также сделанных на их основе выводов.

Диссертация Быстрого Романа Григорьевича «Динамика электронов в неидеальной кластерной наноплазме» представляет собой законченную научно-квалификационную работу высокого уровня, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9

положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Отзыв составлен старшим научным сотрудником отдела физики плазмы кандидатом физико-математических наук В. А. Костиным.

Диссертационная работа была обсуждена на семинаре Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» 28 ноября 2017 года (протокол № 16).

Старший научный сотрудник отдела физики плазмы ИПФ РАН,  
к.ф.-м.н.



Костин Василий Александрович

603950, г. Нижний Новгород. БОКС-120, ул. Ульянова, 46,  
телефон (831) 432-14-46, e-mail vk1@ipfran.ru

Руководитель научного направления «Физика плазмы» ИПФ РАН,  
зам. председателя семинара Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей,  
д.ф.-м.н., профессор



Голубев Сергей Владимирович

603950, г. Нижний Новгород. БОКС-120, ул. Ульянова, 46,  
телефон (831) 416-62-06, e-mail gol@appl.sci-nnov.ru

Почисли В.А. Костин и С.В. Голубева заверяю

Ученый секретарь ИПФ РАН,  
к.ф.-м.н.



Корюкин Игорь Валерьевич

603950, г. Нижний Новгород. БОКС-120, ул. Ульянова, 46,  
телефон (831) 436-86-10, e-mail igor@appl.sci-nnov.ru

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

603950, г. Нижний Новгород. БОКС-120, ул. Ульянова, 46,  
телефон (831) 432-14-77, e-mail dir@appl.sci-nnov.ru