

На правах рукописи

ПОПОВ Сергей Сергеевич

ПРЯМОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЛЕНГМЮРОВСКИХ КАВЕРН
ЛАЗЕРНЫМИ МЕТОДАМИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
ПО НАГРЕВУ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ

01.04.08 – физика плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2009

Работа выполнена в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

БУРМАСОВ
Владимир Степанович – кандидат физико-математических наук,
доцент, Учреждение Российской Академии
наук, Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ПОСТУПАЕВ
Владимир Валерьевич – кандидат физико-математических наук,
доцент, Учреждение Российской Академии
наук, Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

ШАПИРО
Давид Абрамович – доктор физико-математических наук,
профессор, Учреждение Российской
Академии наук, Институт автоматизации и
электрометрии СО РАН,
г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – Институт ядерного синтеза
РНИЦ «Курчатовский институт»,
г. Москва.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2009 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.03
Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, Новосибирск-90,
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ
им. Г.И.Будкера СО РАН.

Автореферат разослан: «_____» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

На установке ГОЛ-М в ИЯФ СО РАН на протяжении ряда лет велись исследования турбулентного нагрева плазмы релятивистским электронным пучком (РЭП). Важным моментом изучения эффективности турбулентного нагрева является определение механизмов передачи энергии турбулентности частицам плазмы. Одним из возможных механизмов является развитие модуляционной неустойчивости и последующего коллапса ленгмюровских волновых пакетов.

Со времени теоретического открытия ленгмюровского коллапса Захаровым В.Е в 1972 г. началось интенсивное изучение коллапса и сильной ленгмюровской турбулентности (СЛТ) и в короткий срок появилось множество теоретических работ и работ по численному моделированию процессов СЛТ.

Однако надежных экспериментальных подтверждений существования ленгмюровского коллапса, как важного элемента развитой СЛТ, было явно недостаточно. Экспериментально коллапсирующие каверны наблюдались, но, как правило, при весьма специфических условиях. Такие опыты проводились в редкой плазме или в одномерной геометрии, или при жестких граничных условиях, что не соответствует ситуации развитой турбулентности (ансамблю случайно распределенных коллапсирующих каверн).

В экспериментах по исследованию развитой СЛТ, в отсутствие подобного детерминизма, разумеется, сложно наблюдать эволюцию отдельной каверны. Поэтому, в подобных опытах изучались интегральные следствия турбулентности: генерация коротковолнового ионного звука, появление немаксвелловских «хвостов» электронной функции распределения, генерация излучения на частоте близкой к плазменной и ее гармоникам. Однако, с помощью подобных исследований трудно однозначно ответить на вопрос о существовании ленгмюровского коллапса в условиях лабораторного эксперимента. Такие эффекты часто допускают иное толкование, не содержащее ленгмюровского коллапса.

Таким образом, для более определенных выводов о существовании ленгмюровского коллапса необходимо иметь прямые экспериментальные наблюдения его событий, причем случайно распределенных в объеме плазмы и во времени. При этом, в связи с практическими приложениями к турбулентному нагреву плазмы до высоких температур, например, в установке ГОЛ-3, данный вопрос особо актуален в случае плотной ($n_e \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) плазмы в достаточно сильном магнитном поле ($B \sim 1 \text{ Тл}$).

Цель диссертации

Цель настоящей диссертации – прямое наблюдение и исследование ленгмюровского коллапса в пучково-плазменной системе с плотной магнитоактивной плазмой.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в том, что впервые в мире с помощью разработанных лазерных методов диагностики проведено прямое наблюдение ленгмюровских каверн в плотной ($n_e \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) плазме в магнитном поле ($B = 2.5 \text{ Тл}$) с высоким уровнем СЛТ. Определены пространственные и временные характеристики ленгмюровских каверн. Уровень ленгмюровской турбулентности, возбуждаемой мощным РЭП ($E \approx 300 \div 500 \text{ кэВ}$, $I \approx 10 \text{ кА}$, $\Delta t_{\text{РЭП}} \approx 100 \text{ нс}$) при нагреве плазмы на установке ГОЛ-М составлял величину $W/nT_e > 0.2$.

Научная и практическая значимость диссертационной работы

Решение этого вопроса имеет значение для дальнейшего развития как теоретических, так экспериментальных исследований сильной ленгмюровской турбулентности, особенно, магнитоактивной плазмы, где магнитная добавка в дисперсию ленгмюровских волн значительно превышает ее тепловую часть. Результаты работы представляют также практический интерес для нагрева в пучково-плазменных системах и в лазерном инерциальном синтезе, а также для других исследований турбулентных явлений, например, в ионосфере земли или космической плазме.

Результаты настоящей работы в части исследования взаимодействия РЭП с неоднородной плазмой используются в постановке эксперимента с дополнительным пучком электронов для улучшения нагрева плазмы в установке ГОЛ-3.

Положения, выносимые на защиту

Основными положениями диссертации, полученными в результате исследований и выносимыми на защиту, являются:

1. Прямое наблюдение каверн в пучково-плазменной системе установки ГОЛ-М.
2. Исследование характерных параметров и размеров наблюдаемых каверн.
3. Создание и модернизация диагностик лазерного рассеяния с высоким временным и пространственным разрешением. Создание метода интерферометрии для измерения плотности плазмы в высоковольтном плазмонаполненном диоде.
4. Результаты исследования взаимодействия электронного пучка с неоднородной плазмой.

Апробация результатов работы

Основные материалы диссертации опубликованы в 14 работах, в том числе, в 5 статьях в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах.

Основные результаты работы докладывались на конференциях: XXVIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, февраль 2001; 28th European Physical Society Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Madeira Technopol, Funchal, Portugal, 18-22 June 2001; XXIX Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, февраль 2002; 29th European Physical Society Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Montreux, Switzerland, 17-21 June 2002; X Всероссийской конференции "Диагностика высокотемпературной плазмы", Троицк, 8-13 июня 2003; 30th European Physical Society Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, St. Petersburg, 7-11 July 2003; 15th International Conference on High-Power Particle Beams, St. Petersburg, 18-23 July 2004.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит 83 страницы текста, 24 рисунка и состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 84 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дано определение основных понятий ленгмюровской турбулентности и коллапса, сделан краткий обзор экспериментальных методов исследования турбулентных процессов в плазме. Показано, что в существующих работах экспериментальные методы исследования ленгмюровского коллапса ориентированы или на единичные акты коллапса в редкой плазме, детерминированные в пространстве и времени внешними условиями, или на интегральные косвенные признаки коллапса.

Определена актуальность работы, сформулированы цель и задачи диссертации. Обоснована необходимость создания адекватных методов диагностики ленгмюровских каверн.

В первой главе описана экспериментальная установка ГОЛ-М, представлены ее основные параметры и диагностики, включая системы когерентного и некогерентного лазерного рассеяния для исследования ленгмюровской турбулентности.

Описана система когерентного рассеяния для исследования быстрой динамики ленгмюровской активности в области ленгмюровской каверны. Для этой диагностики на установке ГОЛ-М использовался импульсный CO₂-лазер, состоящий из задающего генератора и усилителя. Оба модуля представляли собой системы атмосферного давления с поперечным двойным разрядом. Рабочая смесь приготавливалась из углекислого газа, азота, гелия и легкоионизируемой добавки – триэтиламина. Состав газовой смеси в CO₂-генераторе подбирался так, чтобы получался достаточно длинный

(около 1 мкс) импульс излучения, дающий возможность перекрыть по времени инъекцию пучка в плазму. Регистрация рассеянного CO_2 -излучения осуществлялась охлаждаемым жидким азотом КРТ-фотодиодом с чувствительностью порядка 1 кА/Вт, временным разрешением – 5 нс. Размер фоточувствительной поверхности диода составлял $200 \times 200 \text{ мкм}^2$.

Приведено подробное описание ключевого метода прямого поиска и наблюдения мелкомасштабных провалов плотности, сопутствующих ленгмюровскому коллапсу, на основе рассеяния излучения лазера на стекле, активированном неодимом, (с необходимым пространственным и временным разрешением). Лазер представлял многомодульную сборку, дающую на выходе импульс излучения на длине волны 1.053 мкм, длительностью 60 нс и энергией порядка 20 Дж.

Схема некогерентного рассеяния представлена на рис. 1. Лазерный луч, пересекающий плазму перпендикулярно магнитному полю, фокусировался на ось плазменной камеры до диаметра 0.2 мм и выводился через окно, установленное под углом Брюстера.

Изображение объема рассеяния ($0.2 \times 0.2 \times 1 \text{ мм}^3$) передавалось телескопическим объективом ($F = 13 \text{ см}$, $\varnothing = 5.5 \text{ см}$) на торец световода с последующей его передачей на лавинный фотодиод С30955Е. Чувствительность и временное разрешение диода соответственно равны 35 А/Вт и 2 нс, а площадь фоточувствительной поверхности равна 1 мм^2 .

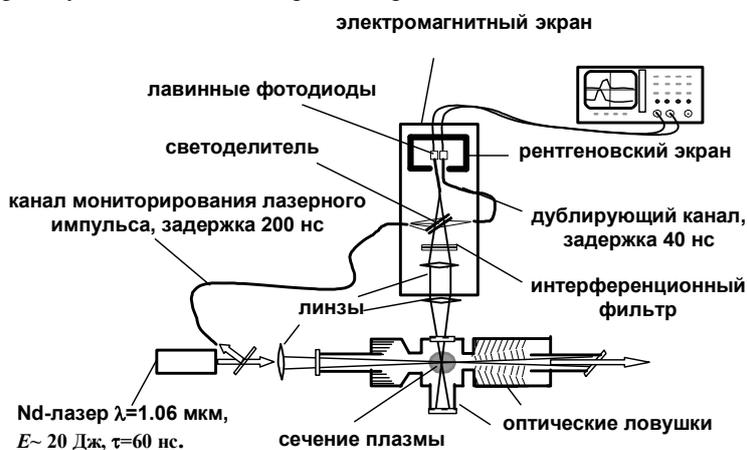


Рис. 1. Схема рассеяния в экспериментах по наблюдению динамических провалов плотности.

Детально описан способ выделения временной динамики плотности плазмы, путем сравнения контура сигнала рассеянного излучения с формой лазерного импульса, регистрируемых на одном луче осциллографа. Для этого часть лазерного импульса (блик от поворотной призмы) направлялась

по световоду в систему регистрации с задержкой 200 нс относительно сигнала рассеяния (канал мониторинга на рис. 1).

Для проверки того, что изменения формы импульса рассеянного излучения не связаны с электромагнитными помехами, возникающими в системе регистрации при генерации РЭП, применялось дублирование регистрации рассеянного излучения. С этой целью часть рассеянного излучения, отделенная 50%-зеркалом, через оптическую линию задержки в 40 нс направлялась на независимый канал регистрации.

Существенное внимание уделено проблеме паразитного излучения на несмещенной лазерной частоте, подавляемое интерференционным фильтром с полосой пропускания равной 40 нм.

Кроме этого приведено описание интерферометрической методики для диагностики плазмы в высоковольтном плазмонном диоде, созданной с целью оптимизации работы ускорителя.

Во второй главе представлены результаты прямого наблюдения и исследования каверн плотности плазмы, а также исследования динамики ленгмюровской активности.

Приведены типичные осциллограммы сигналов рассеяния, полученные в двух различных выстрелах, и соответствующая им рассчитанная динамика относительной плотности плазмы (см. рис. 2). Видно, что провалы, зарегистри-

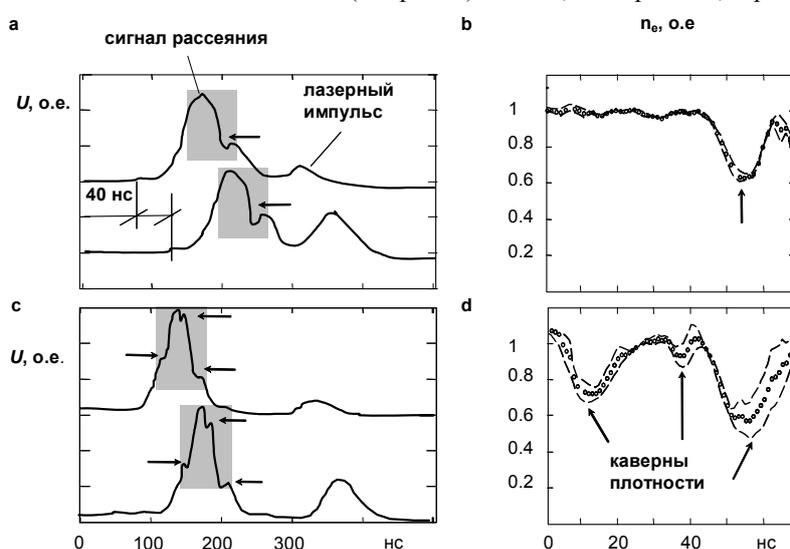


Рис. 2. Регистрация провалов плотности (отмечены стрелками) методом оптического дублирования сигналов рассеяния с задержкой 40 нс. а, с - сигналы рассеяния; b, d - динамика плотности n_e , рассчитанная для интервалов, отмеченных прямоугольниками. Точечные кривые - среднее между полученными в разных каналах величинами плотности.

пированные в основном канале, повторяются на дублирующем сигнале, сдвинутом на 40 нс. Наблюдаемые провалы достигали глубины более 30% при характерной длительности $\tau = 10 \div 30$ нс.

Как следует из экспериментов, появление провалов плотности носит пороговый по плотности тока РЭП характер. Ленгмюровские каверны наблюдались в тех выстрелах, когда плотность тока релятивистского диода превосходила вакуумную ($J_b \approx 1 \text{ кА/см}^2$) в 2-3 раза. В диссертации это объяснено повышением уровня турбулентности плазмы с ростом плотности тока инжектируемого РЭП.

Таким образом, связь наблюдаемых случайных динамических провалов плотности с ленгмюровским коллапсом подтверждается пороговым характером их появления по плотности тока, и соответствующей интенсивностью ленгмюровских флуктуаций, наблюдаемых по коллективному рассеянию.

Описаны опыты с многоканальными системами регистрации рассеянного излучения, позволившими продемонстрировать локальность образующихся ямок плотности и определить их характерные размеры. Показано, что поперечный к магнитному полю размер каверн составляет величину около 1 мм, а продольный ограничен размерами $3 \text{ мм} < l_{||} \leq 8 \text{ мм}$.

Далее в этой главе описаны эксперименты по наблюдению быстрой динамики ленгмюровской активности. Показано, что в условиях появления каверн плотности интенсивность турбулентности испытывает всплески и провалы с длительностью, близкой ко времени существования каверн плотности. Кроме того, эти всплески и провалы в амплитуде когерентно рассеянного излучения так же как и провалы плотности возникают во второй половине инжекции электронного пучка в плазму (см. рис. 3). Такое совпадение согласуется с механизмом образования каверн плотности, связанным с волновым коллапсом турбулентных ленгмюровских колебаний.

В конце главы приведено обсуждение результатов наблюдения и исследования провалов плотности.

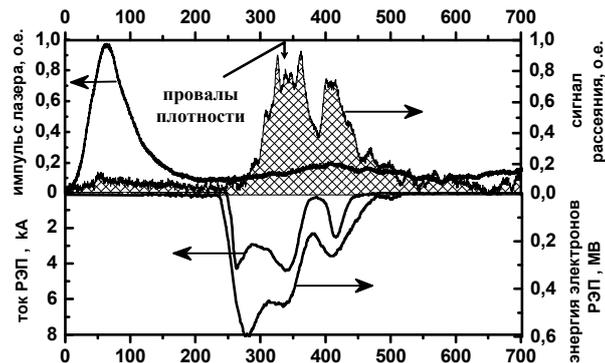


Рис. 3. Осциллограммы сигналов, полученные в режиме с инжекцией усиленного РЭП ($J_b \geq 3 \text{ кА/см}^2$, $d \approx 13 \text{ мм}$).

В третьей главе проанализировано влияние неоднородности плазмы на возбуждение ленгмюровской турбулентности релятивистским электронным пучком. Для определения продольного градиента плотности использовался разработанный с целью оптимизации работы плазмонного диода CO_2 -интерферометр, собранный по схеме Маха-Цандера. В ходе экспериментов было показано, что пучок электронов, сформированный в области редкой плазмы ($n \leq 10^{13} \text{ см}^{-3}$), преодолевая переходную область с резким градиентом плотности, практически не разрушается, и как следствие, сохраняет малый угловой и энергетический разброс электронов необходимый для эффективного вклада энергии в область взаимодействия плотной плазмы с РЭП.

На основании этого результата сделан положительный вывод о возможности использования дополнительного пучка электронов для улучшения параметров плазмы в установке ГОЛ-3. Кроме того, обсуждается применение настоящих результатов для подтверждения концепции быстрого поджига в лазерном УТС, опирающейся на турбулентные механизмы поглощения вторичного пучка электронов в неоднородной плазме лазерной мишени.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

I. Наблюдение и исследование локализованных провалов плотности.

1. Создана диагностическая система для регистрации провалов плотности методом томсоновского рассеяния. С ее помощью в экспериментах на пучково-плазменной системе установки ГОЛ-М были обнаружены динамические провалы плотности (каверны, $\delta n/n \leq 40\%$; $\tau \sim 10$ нс) в плотной магнитоактивной плазме ($n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $\omega_{ce} \sim 10^{11} \text{ с}^{-1}$).
2. Для измерения характерного поперечного к магнитному полю размера каверн создана четырехканальная система регистрации сигналов рассеяния. Экспериментально определенный поперечный размер каверн составил величину $l_{\perp} \sim 1$ мм.
3. Разработан оригинальный способ измерения продольного к магнитному полю размера каверн. Для этого пучок зондирующего излучения с помощью разрезанной на две части линзы был разделен пополам и сфокусирован в две точки на одной силовой линии магнитного поля. В результате получены верхняя и нижняя границы продольного размера каверн: $3 \text{ мм} < l_{\parallel} < 8 \text{ мм}$. Таким образом, каверны имеют сигарообразную форму, что согласуется с расчетами порога модуляционной неустойчивости в продольном и поперечном направлениях.

4. Установлено, что образование каверн пороговым образом зависит от плотности тока инжектируемого в плазму РЭП, что можно интерпретировать возникновением провалов в результате модуляционной неустойчивости и ленгмюровского коллапса.

II. Динамика ленгмюровской турбулентности.

5. Для наблюдения быстрой динамики ленгмюровских колебаний применена техника коллективного рассеяния на базе CO_2 -лазера. В этих исследованиях нами было улучшено временное разрешение системы регистрации ($\tau \sim 5$ нс). В результате в условиях, аналогичных тем, в которых были зарегистрированы каверны, обнаружены пики и провалы в сигналах коллективного рассеяния в окрестности пространственного спектра колебаний, резонансного с РЭП. Характерная длительность этой временной структуры в сигналах рассеяния совпадает со временем жизни каверн плотности ($\tau \sim 10$ нс). Это можно интерпретировать как увеличение спектральной плотности ленгмюровских колебаний на стадии образования коллапса и «выгорание» колебаний при его развитии.

III. Возбуждение СЛТ релятивистским электронным пучком в плазме с неоднородностью.

6. Методом ИК интерферометрии определен масштаб неоднородности плазмы в месте инжекции РЭП.
7. Экспериментально показано, что при транспортировке в неоднородной плазме пучок не «разрушается».
8. Обоснована эффективность метода турбулентного сценария в схеме «быстрого поджига» с коллективным механизмом поглощения энергии релятивистских электронов в плотной плазме при лазерном УТС.
9. Подтверждена возможность инжекции дополнительного миллисекундного пучка в основную плазму установки ГОЛ-3 через область редкой плазмы для поддержания необходимого уровня ленгмюровской турбулентности.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] *L.N. Vyacheslavov, V.S. Burmasov, I.V. Kandaurov, E.P. Kruglyakov, O.I. Meshkov, S.S. Popov, and A.L. Sanin.* Strong Langmuir turbulence with and without collapse: experimental study. // *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2002, v. 44, p. B279.
- [2] *Бурмасов В.С., Кандауров И.В., Кругляков Э.П., Попов С.С., Санин А.Л.* ИК интерферометр для исследования плазмонного релятивистского диода. // *Приборы и техника эксперимента*, 2004, №1, с.94-97.
- [3] *Бурмасов В.С., Вячеславов Л.Н., Кандауров И.В., Кругляков Э.П., Мешков О.И., Попов С.С.* Система томсоновского рассеяния для прямого наблюдения ленгмюровских каверн. // *Физика плазмы*, 2004, т.30, с.190-194.
- [4] *V.S. Burmasov, I.V. Kandaurov, E.P. Kruglyakov, S.S. Popov.* Method for studying local dynamics of plasma fluctuations in the formation process of Langmuir cavities. // *Transactions of Fusion Science and Technology*, 2005, v.47, p.294-298.
- [5] *В.В. Васильев, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, И.В. Марчишин, Ю.Г.Сидоров, А.О. Сусяков, В.Н. Овсяк, В.С. Бурмасов, [6] Э.П. Кругляков, А.Л. Асеев, Попов С.С.* СВЧ-детектор на основе КРТ-фотодиода для исследования субтермоядерной плазмы. // *Автоматика*, 2007, № 4, Т. 43, С. 5-16.
- [6] *В.С. Бурмасов, О.И. Мешков, Л.Н. Вячеславов, В.Ф. Гурко, И.В. Кандауров, Э.П. Кругляков, С.С. Попов, А.Л. Санин.* Наблюдение локализованных динамических провалов плотности в плазме с сильной ленгмюровской турбулентностью. // *Тезисы докладов XXVIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС*, Звенигород, февраль 2001, с.228..
- [7] *V.S. Burmasov, V.F. Gurko, I.V. Kandaurov, E.P.Kruglyakov, O.I. Meshkov, S.S. Popov, A.L. Sanin, L.N. Vyacheslavov, V.F. Zharov.* Observation of small-scale density depletions in the plasma with strong Langmuir turbulence. 28-th EPS Conf. on Controlled Fusion. and Plasma Phys.: Contributed Papers, Madeira Technopolis, Funchal, Portugal, 18-22 June 2001, P.4.111.
- [8] *В.С. Бурмасов, О.И. Мешков, Л.Н. Вячеславов, И.В. Кандауров, Э.П. Кругляков, С.С. Попов, А.Л. Санин.* Пространственные размеры каверн в

- плазме с сильной ленгмюровской турбулентностью в магнитном поле. // Тезисы докладов XXIX Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, февраль 2002, с.169.
- [9] *В.С.Бурмасов, О.И. Мешков, Л.Н. Вячеславов, И.В. Кандауров, Э.П. Кругляков, С.С. Попов, А.Л.Санин.* Исследование поведения плотности плазмы в плазмонаполненном диоде методом ИК интерферометрии. // Тезисы докладов XXIX Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, февраль 2002, с.170.
- [10] *L.N. Vyacheslavov, V.S. Burmasov, I.V. Kandaurov, E.P. Kruglyakov, O.I. Meshkov, S.S. Popov, and A.L. Sanin.* Strong Langmuir turbulence with and without collapse: experimental study. // 29th European Physical Society Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion. Abstracts of Invited and Oral Papers. - European Physical Society, Montreux, Switzerland, 17-21 June, 2002, p.I-4.02.
- [11] *Бурмасов В.С., Кандауров И.В., Кругляков Э.П., Попов С.С., Санин А.Л.* ИК интерферометр для исследования плазмонаполненного релятивистского диода. //Тезисы докладов X Всероссийской конференции "Диагностика высокотемпературной плазмы", Троицк, 8-13 июня 2003, с.8-9.
- [12] *Бурмасов В.С., Вячеславов Л.Н., Кандауров И.В., Кругляков Э.П., Мешков О.И., Попов С.С.* Система томсоновского рассеяния для прямого наблюдения ленгмюровских каверн. //Тезисы докладов X Всероссийской конференции "Диагностика высокотемпературной плазмы",Троицк, 8-13 июня 2003, с.51-52.
- [13] *L. N. Vyacheslavov, V. S. Burmasov, I. V. Kandaurov, E. P. Kruglyakov, S. S. Popov and A. L. Sanin.* Collective beam-plasma interaction for REB passed through inhomogeneous low-density plasma. //30th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 7-11 July 2003 ECA., v. 27A, p-2.24.
- [14] *Igor V. Kandaurov, Vladimir S. Burmasov, Edward P. Kruglyakov, Sergey S. Popov, Andrey L. Sanin, Leonid N. Vyacheslavov.* Study of plasma-filled, magnetized foilless diode and production of electron beam with high current density. // Proceeding of 15th Inter. Conf. on High-Power Particle Beams, July 18-23, 2004, St. Petersburg, p.162.

ПОПОВ Сергей Сергеевич

Прямое наблюдение ленгмюровских каверн
лазерными методами в экспериментах
по нагреву плазмы пучком электронов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор .25.02. 2009 г.
Подписано в печать 27.02. 2009 г.
Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 печ.л.,0.8 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 5

Обработано на РС и отпечатано
на ротапинтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11