

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Чайковского Станислава Анатольевича

На тему «Экспериментальные исследования формирования плотной излучающей плазмы в диодах наносекундных генераторов тока мегаамперного диапазона»
по специальности 01.04.13-электрофизика, электрофизические установки
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Актуальность избранной темы.

Диссертационная работа посвящена востребованным исследованиям формирования и динамики плотной плазмы в мощных импульсных системах, генерирующих токи амплитудой от сотен килоампер до единиц мегаампер с временем нарастания 100-1000 нс. Уникальные возможности такой мощной импульсной техники позволяют достигать в лабораторных условиях экстремальных состояний вещества, характеризующихся высокой температурой (до единиц кэВ), плотностью вплоть до твердотельной, давлением мегабарного диапазона, магнитными полями мегагауссного уровня. Исследования характеристик таких состояний является фундаментальной задачей. Одним из практических перспективных приложений исследований в этом направлении, является реализация инерциального управляемого термоядерного синтеза, которая, несмотря на значительный прогресс, до сих пор носит элементы фундаментального характера. Интенсивный интерес в настоящее время проявляется и к изучению радиационных свойств плотной высокотемпературной плазмы, создаваемой в результате электродинамического сжатия плазменных лайнеров (быстрых Z-пинчей). С практической точки зрения это обусловлено возможностью создания мощных источников мягкого рентгеновского излучения, например, для микролитографии, работ в области стойкости материалов радиационному воздействию. Обширен диапазон фундаментальных аспектов использования плазменных лайнеров - например, изучение переноса излучения в плотной плазме, плазменных неустойчивостей различного типа, моделирование астрофизических явлений в лабораторных условиях. Отличительной особенностью X-пинчей является возможность достижения высокой плотности энергии в плазме размеров несколько микрометров, что обеспечивает высокую яркость источника излучения в мягком рентгеновском диапазоне спектра. Физические процессы в X-пинчах, а также возможность реализации на их основе диагностических методик импульсного теневого зондирования с высоким разрешением привлекают внимание мирового научного сообщества.

Таким образом, можно утверждать, что тема исследований диссертационной работы Чайковского С.А. является актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Выдвинутые автором научные положения, выводы и рекомендации четко сформулированы и надежно обоснованы в тексте диссертации. Полученные результаты хорошо известны научной общественности, опубликованы в солидных журналах, докладывались на многочисленных конференциях.

Достоверность и новизна, полученных результатов.

Достоверность полученных автором результатов не вызывает сомнений, поскольку она основана на использовании целого комплекса современных методов исследований, среди которых основополагающую роль занимают тщательно проведенные эксперименты. В них применялись как традиционные, так и новые методы диагностики, которые представляются достаточно надежными и адекватными поставленным задачам. Полученные данные внутренне непротиворечивы и согласуются с результатами других исследователей.

В диссертации представлен целый спектр новых результатов.

В экспериментах получен широкий набор новых данных по поверхностному плазмообразованию ряда металлов в импульсных магнитных полях с амплитудой до 500 Т. Анализ этих данных позволил сформулировать критерий скин-слоевого взрыва (поверхностного плазмообразования) проводников.

Разработана и реализована оригинальная, ранее не применявшаяся методика измерения скорости проникновения сверхсильного азимутального магнитного поля в цилиндрические проводники.

Впервые экспериментально показано влияние двухслойной структуры проводника при проводимости внешнего слоя меньше проводимости внутреннего на поверхностное плазмообразование в мегагауссовых магнитных полях, заключающееся в существенном увеличении времени формирования плазмы.

Предложена и подтверждена экспериментально новая модель формирования микронного источника излучения на основе Х-пинча, в которой определяющую роль играет длина перетяжки, определяющая наряду с параметрами проволочек Х-пинча и характеристиками генератора момент генерации импульса рентгеновского излучения.

Создан ряд оригинальных импульсных генераторов тока, целенаправленно предназначенных для работы с Х-пинчами в качестве диагностических комплексов теневого проекционного рентгеновского зондирования. Достигнутые микронный размер источника излучения, наносекундная длительность импульса излучения, высокая точность синхронизации с внешними устройствами наряду с компактностью установок ставят их в ряд новых диагностических инструментов регистрации быстропротекающих процессов.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов.

Ценность полученных результатов, их научная и практическая значимость состоит в широком наборе качественных экспериментальных данных по сжатию плазменных лайнеров, по нелинейной диффузии магнитного поля и взаимодействию сверхсильных магнитных полей с металлами, по динамике процессов в X-пинчах и их обоснованной физической интерпретации на основании известных и разработанных моделей; в развитии перспективного метода диагностики быстропротекающих процессов на основе X-пинча и импульсных генераторов тока, компактность и низкий вес которых позволяет применять этот метод в целях теневого рентгеновского зондирования в любых лабораториях; в формулировке критерия подобия для X-пинчей, позволяющего предсказывать момент рентгеновской вспышки исходя из характеристик проводочек X-пинча и параметров генератора тока; в эмпирически обоснованной формулировке критерия электрического взрыва проводников в скиновом режиме. Ряд полученных результатов и обобщений могут быть использованы в качестве практических рекомендаций при проектировании и создании мультимегаамперных генераторов тока, представляющих интерес для актуальных исследований экстремальных состояний вещества, генерации мощных импульсов мягкого рентгеновского излучения, исследований в области инерциального термоядерного синтеза.

Оценка содержания диссертации, её завершенность

Объем диссертации составляет 277 страниц, включая список литературы из 338 научных работ, 18 таблиц и 145 рисунков. Диссертация структурирована следующим образом: введение, девять глав, из которых первая является обзором научной литературы, заключение, список цитируемой публикаций. Автореферат в достаточной степени отражает содержание диссертации.

Введение посвящено обоснованию и формулировке целей, задач исследований, их актуальности. Изложены защищаемые научные положения, научная и практическая значимость работы, научная новизна полученных результатов. Кратко описана структура диссертации.

В первой главе представлен подробный обзор научной литературы по теме диссертации. Проведено рассмотрение основных физических процессов при диффузии мегагауссного магнитного поля в металл, электрическом взрыве проводников в наиболее типичном для экспериментальных работ режиме с равномерным распределением тока, а также в достаточно редком в силу технической сложности скиновом режиме. Представлено современное состояние исследований в области устойчивости сжатия плазменных лайнеров, эффективности генерации мягкого рентгеновского излучения, развития

диагностических рентгеновских методик на основе X-пинча. Глава содержит достаточно полное обоснование целей и задач диссертации, их актуальности.

Во второй главе описаны результаты демонстрационных экспериментов по реализации способа увеличения тока в нагрузке мощного импульсного генератора МИГ за счет применения так называемого трансформатора тока нагрузки. Большое внимание уделено калибровке измерительной аппаратуры, что обеспечивает достоверность полученных результатов. Детали эксперимента описаны подробно, что дает полное представление об устройстве трансформатора. Показана возможность полуторакратного увеличения тока нагрузки, что позволяет значительно продвинуться в достижении пиковых значений индукции магнитного поля в экспериментах по нелинейной диффузии и поверхностному взрыву проводников.

В третьей главе изложены результаты работ по созданию малогабаритных импульсных генераторов тока с амплитудой 150-300 кА и временем нарастания тока 150-200 нс, предназначенных для работы с X-пинчами. Представлены результаты тестирования таких генераторов в излучательном режиме, продемонстрирована возможность получения качественных теневых изображений микронных объектов в мягком рентгеновском диапазоне спектра при длительности зондирующего импульса 2-4 нс. Компактность генераторов, качественные характеристики источника излучения на основе X-пинча ставят такие генераторы в ряд новых успешных диагностических методик в физике плазмы.

В главе 4 результаты разработок компактных импульсных генераторов изложены в аспекте их реального применения для зондирования быстропотекающих плазменных явлений. Эксперименты проведены на сильноточном генераторе Ангара-5-1 (ТРИНИТИ, г. Троицк). Реализована наносекундная синхронизация зондирующего импульса с импульсом тока генератора Ангара-5-1, обеспечена высокая степень помехозащищенности, и наносекундное временное и микронное пространственное разрешение. Это позволило провести демонстрационные эксперименты, в ходе которых получены теневые изображения микропроводников многопроволочного лайнера, сжимаемого импульсом тока генератора Ангара-5-1 в начальной стадии сжатия лайнера.

В главе 5 представлены результаты моделирования и экспериментальных работ, целью которых было обоснование зависимости момента рентгеновской вспышки от начальных параметров X-пинча и формы импульса тока генератора. Хорошее соответствие результатов численного моделирования и данных эксперимента служит подтверждением адекватности разработанной модели.

Глава 6 содержит результаты экспериментов с каскадированными лайнерами, проведенных на генераторах различного уровня тока и времени нарастания. Анализ результатов позволил выделить диапазон параметров лайнеров, в котором достигается формирование компактных (радиусом около 1 мм и меньше) плазменных пинчей при высоком уровне энерговысвобождения на ион

плазмы. Выявленные характерные особенности сжатия лайнеров в этом диапазоне позволили сделать ряд обоснованных предположений о физических процессах при сжатии, обеспечивающих эффективный энерговыход в вещество внутреннего каскада двухкаскадного лайнера при сохранении устойчивости его сжатия.

В Главе 7 изложены аналитические оценки и результаты численного моделирования процесса проникновения магнитного поля мегагауссного уровня в металлические проводники. Приведены результаты экспериментальных работ по разработке методики определения скорости диффузии магнитного поля и собственно экспериментальные результаты, полученные с использованием такой методики. Показано неплохое качественное и количественное совпадение результатов оценок, численного моделирования и эксперимента.

Другой аспект взаимодействия импульсного сверхсильного магнитного поля с проводниками представлен в главе 8. Речь идет о явлении плазмообразования на поверхности проводника вследствие джоулева разогрева поверхностных слоев. Иначе это явление можно назвать электрическим взрывом проводника в режиме скинирования тока. Изложены результаты экспериментов, проведенных на сильноточном генераторе МИГ тераваттного уровня мощности, по изучению поверхностного взрыва проводников из металлов с различной проводимостью. Сформулирован и эмпирически обоснован критерий скинового взрыва проводников.

Глава 9 посвящена дальнейшему развитию исследований скинового взрыва проводников. Так как образование плазмы на поверхности в большинстве случаев является нежелательным эффектом, предложен способ, позволяющий значительно задержать момент взрыва поверхности в импульсных магнитных полях, а именно применение двухслойной структуры проводника. Обоснование физических процессов в проводниках с такой структурой проведено на основании численного моделирования и сравнения с результатами экспериментов.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы и перспективы использования ее результатов.

В целом, диссертация представляет собой внутренне согласованный и заверченный труд.

Достоинство и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Диссертация Чайковского Станислава Анатольевича представляет собой хорошо структурированный научный труд, имеющий несомненную ценность для научного сообщества и перспективу применения полученных результатов для развития высоких технологий. Тем не менее, имеются замечания по тексту диссертации.

1. На странице 13 в разделе «Теоретическая и практическая значимость работы» говорится, что значимость проделанной работы заключается в возможности, в том числе, синтеза новых материалов. Однако в тексте

диссертации это утверждение подробно не раскрывается, что делает его недостаточно обоснованным.

2. В главе 2 представлены результаты экспериментов с трансформатором тока нагрузки на сильноточном генераторе МИГ. Полученные результаты представляют несомненный интерес, как реализация сравнительно простого способа согласования генератора с нагрузкой, позволяющего увеличить амплитуду тока. Тераваттный уровень мощности, при котором проведены эксперименты, дополнительно подчеркивает значимость этого научного результата. Представляется странным, что достижение такого уровня не вошло в защищаемые положения.

3. В тексте имеется путаница с определениями «Интеграл действия» и «Интеграл удельного действия»: Например; на стр. 130 приводятся значения интегралов удельного действия, которые соответствуют интегралам действия, приведенному в Таблице 1.1. Это касается также Таблицы 1.2 на стр. 26, данных на стр. 27.

4. Имеется ряд замечаний по аккуратности оформления работы. Так, например, на стр.11 заголовок «научная новизна» расположен в самом низу страницы, а текст на следующей странице; на стр. 82-83 имеется повтор текста из Главы 1; На стр.95, рисунок 3.16, в подписи значится «патрубки для откачки вакуума»; а стр. 118 рисунок 4.7 повторяет рисунок 3.20 на стр.101.

Отмеченные недостатки, тем не менее, не снижают, высокой оценки диссертационной работы.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации.

Тематика диссертационной работы и ее содержание полностью соответствуют специальности 01.04.13 - электрофизика, электрофизические установки.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Заключение


Диссертация С.А. Чайковского «Экспериментальные исследования формирования плотной излучающей плазмы в диодах наносекундных генераторов тока мегаамперного диапазона», на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, является завершённым научным исследованием, выполненном на высоком профессиональном уровне. Развитые в диссертационной работе новые теоретические положения и полученные новые экспериментальные результаты вносят существенный вклад в развитие физики плазмы, мощной импульсной техники, физики экстремальных состояний вещества и диагностики быстропротекающих процессов, их совокупность можно квалифицировать как научное достижение. Достоверность полученных результатов, их научная новизна, фундаментальная и практическая ценность

сомнений не вызывают. Совокупность выполненных исследований по созданию компактных комплексов для импульсной рентгенографии с высоким временным и пространственным разрешениями можно характеризовать, как новое научное направление. Результаты исследований докладывались на известных международных конференциях, представлены в весомых научных рецензируемых журналах. Автор известен мировой общественности, как специалист высокого уровня в области электрофизики и сильноточной электроники, диагностики быстропротекающих плазменных процессов.

Представленная диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Станислав Анатольевич Чайковский заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13-электрофизика, электрофизические установки.

Официальный оппонент, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук, Бурдаков Александр Владимирович.
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.
Телефон: +7 (383) 329-47-60, e-mail: A.V.Burdakov@inp.nsk.su

12. 09.2016 г.

 Бурдаков А.В.

Подпись Бурдакова А.В. удостоверяю,
Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, кандидат физико-математических наук,

Ракшун Л.В.

