

## ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию  
Колмогорова Антона Вячеславовича  
"Инжектор пучка атомов водорода высокой яркости  
для источника поляризованных ионов"  
01.04.20 - физика пучков заряженных частиц

### **Актуальность темы диссертации.**

Многолетний интерес и активные исследования возможности создания источника поляризованных ионов высокой яркости обусловлены потребностями ядерной физики. Для экспериментов на современных ускорителях высоких энергий необходимы все более интенсивные, более качественные пучки поляризованных ионов. Традиционным методом создания пучков поляризованных протонов является перенос поляризации от захваченного протоном оптически поляризованного электрона ядру атома водорода. Успехи такого подхода во многом определяются характеристиками используемого источника ионов, яркостью и качеством его пучка. В диссертационной работе в качестве такого источника впервые используется вакуумно-дуговой генератор плазмы с многоапертурной четырехэлектродной ионно-оптической системой с баллистической фокусировкой.

Отметим, что полученные интенсивные пучки ионов высокого качества представляют интерес не только для ускорительной техники, но для целого ряда других приложений, например, в микроэлектронике для модификации поверхностей, ионной имплантации, в термоядерных исследованиях для создания, греющих плазму потоков нейтральных атомов, для локальной диагностики термоядерной плазмы.

Таким образом, исследования, составившие основу диссертационной работы, являются весьма важными и актуальными.

**Во введении** диссертационной работы представлен обзор предшествующих экспериментальных работ, обсуждается актуальность проводимых исследований, сформулирована ее научная новизна и практическая ценность.

**В первой главе** диссертации подробно описан процесс получения пучка поляризованных ионов в реальном источнике поляризованных частиц коллайдера RHIC. Обсуждаются требования к источнику ионов, определяются его оптимальные параметры. Высокая плотность тока достигается благодаря использованию многоапертурной системой экстракции с баллистической фокусировкой, осуществленной с помощью сферических электродов. Рассчитаны оптимальные параметры фокусировки. Показано, что при начальной поперечной температуре ионов 0.2 эВ и эмиссионной плотности тока  $0.4 \text{ А/см}^2$  в фокальной области на расстоянии 200 см величина локальной угловой расходимости не превышает 6 мрад.

**Во второй главе** диссертации обсуждаются эксперименты с использованием разработанного инжектора быстрых атомов в источнике поляризованных ионов в Брукхэвенской национальной лаборатории. Разработанный инжектор позволяет работать с высокой плотностью тока пучка (более  $300 \text{ мА/см}^2$ ) при энергии частиц на уровне 10 кэВ и с локальной угловой расходимостью на уровне 10 мрад.

**В третьей главе** приводятся результаты экспериментальных исследований временной стабильности работы инжектора быстрых атомов в составе источника поляризованных ионов. Временная стабильность работы источника в ускорителе является одной из

важных характеристик - источник должен работать с частотой повторения импульсов 1 Гц в течение нескольких месяцев. В диссертационной работе проведены ресурсные испытания источника, которые позволили выявить слабые места установки. Таким элементом оказался дуговой генератор плазмы. Во время горения вакуумно-дугового разряда происходит эрозия катода, распыление металла и его осаждение на внутренние поверхности генератора, что со временем, начинает влиять, в первую очередь, на стабильность поджига разряда. Модернизация источника с учетом полученных экспериментальных данных позволила добиться стабильного режима работы при частоте импульсов 1 Гц и длительности импульса 500 мкс в течение трех месяцев.

**Четвертая глава** диссертационной работы посвящена исследованиям возможности использования разработанного источника ионов для получения интенсивных пучков отрицательных ионов водорода. Традиционным и достаточно эффективным способом генерации отрицательных ионов водорода является перезарядка в сверхзвуковых струях щелочных металлов. В экспериментах в качестве мишени использовалась рециркулирующая натриевая мишень, работающая при температуре парообразования. Максимальная величина тока отрицательных ионов водорода достигала 36 мА при использовании источника с магнитной фокусировкой, и 34 мА при использовании инжектора быстрых атомов.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационной работы.

Среди результатов, обладающих **научной новизной**, отметим следующие.

В диссертационной работе для формирования пучка ионов из плазмы вакуумно-дугового разряда впервые используется многоапертурной четырехэлектродной экстрактор с баллистической фокусировкой. Отметим, что разработанный инжектор с баллистической фокусировкой, позволил получить пучки ионов с рекордными характеристиками: плотность тока более  $300 \text{ мА/см}^2$ , энергией 5–10 кэВ, локальной угловой расходимостью менее 10 мрад и яркостью более  $0.8 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2\text{рад}^2$ .

Использование разработанного инжектора атомов в составе источника поляризованных ионов в Брукхэвенской национальной лаборатории обеспечило получение пучка поляризованных ионов со степенью поляризации 85% и током более 1 мА, что увеличило светимость коллайдера RHIC в 2 раза.

При фокусировке полученного пучка атомов водорода на сверхзвуковой поток паров натрия получен пучок отрицательных ионов водорода с длительностью 0.5 мс и током на уровне 30 мА.

Полученные в диссертационной работе результаты обладают всеми признаками новизны, их достоверность не вызывает сомнения и подтверждается апробацией в многочисленных докладах на конференциях.

**Практическая и научная значимость** полученных в диссертации результатов заключается в возможности применения разработанного источника с баллистической фокусировкой в крупных ускорительных центрах, причем надежность и работоспособность источника продемонстрирована экспериментами, проведенными в Брукхэвенской национальной лаборатории. Отметим, что развитые методы и подходы представляют интерес и для разработки источника отрицательных ионов водорода.

#### **Замечания по диссертационной работе**

1. Диссертация в основном посвящена исследованию возможности разработки источников протонов с уникальными параметрами, получены пучки с плотностью тока на уровне  $300 \text{ мА/см}^2$ . Для определения качества полученного пучка ионов естественным



было бы измерить и привести значение его эмиттанса, однако в диссертации приводится только величина локальной угловой расходимости (менее 10мрад).

2. В диссертационной работе разработан источник ионов водорода на основе дугового разряда с многоапертурной четырехэлектродной системой экстракции и баллистической фокусировкой, что позволило получить пучки с рекордными характеристиками. Однако вопросы о влиянии примесей на работу такого источника и исследования состава полученного пучка ионов в диссертации не рассмотрены хотя при использовании в качестве источника плазмы дугового разряда в плазме должны присутствовать ионы материала катода (об этом, в частности, свидетельствуют и экспериментальные данные об эрозии катода, полученные в диссертации). Эти вопросы представляются интересными, а их обсуждение в диссертации целесообразными.

3. Отметим и некоторую стилистическую небрежность в оформлении работы. Например, расшифровки аббревиатур RHIC OPPIS в автореферате нет, о том, что источником плазмы в разрабатываемом инжекторе является дуговой разряд, впервые упоминается на странице 8 автореферата в подписи под рисунком. До этого обсуждаются способы баллистической фокусировки, расчеты экстрактора и т.д., а об используемом источнике плазмы можно только догадываться. Правда, в тексте самой диссертации все аббревиатуры расшифрованы, а дуговые источники плазмы подробно описаны.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Отметим, что факт использования разработанного инжектора в реальных экспериментах на коллайдере RHIC одним из крупнейших ускорителей мира уже обеспечивает положительную оценку диссертационной работы. В целом диссертационная работа А.В.Колмогорова выполнена на высоком научном уровне и содержит решение сложных экспериментальных задач, связанных с получением качественных пучков ионов с высокой яркостью. Диссертация представляет собой законченное исследование. Результаты работы достаточно полно представлены в публикациях автора. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Колмогорова Антона Вячеславовича "Инжектор пучка атомов водорода высокой яркости для источника поляризованных ионов" удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц

Официальный оппонент,

д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель направления "Физика плазмы" ИПФ РАН, гл.н.с.

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»,

Нижний Новгород, ул. Ульянова 46, т. 831 4365810,

e-mail [dir@appl.sci-nnov.ru](mailto:dir@appl.sci-nnov.ru)

Голубев Сергей Владимирович

29 июня 2018 года

Подпись Голубева Сергея Владимировича заверяю:

Ученый секретарь ИПФ РАН

к.ф.-м.н. Корюкин И.В.

