

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.075.02 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 26.04.2019 № 6

О присуждении Ступину Алексею Николаевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Формирование потока ионов в плазмооптическом масс-сепараторе» по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 15 февраля 2019 г., протокол № 2 диссертационным советом Д 003.075.02 на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, приказ Минобрнауки №1514/НК от 25.11.2016.

Соискатель Алексей Николаевич Ступин 1993 года рождения, в 2015 году закончил с отличием Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения. В 2019 году А. Н. Ступин заканчивает программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре на базе Федерального бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ИРНИТУ).

Диссертация выполнена в научно-исследовательской лаборатории плазменной радиофизики Института высоких технологий ИРНИТУ. Министерство науки и высшего образования.

Научный руководитель – Строкин Николай Александрович, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник научно-исследовательской части ФГБОУ ВО «ИРНИТУ».

Официальные оппоненты:

Паперный Виктор Львович – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой общей и космической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет»;

Кичигин Геннадий Николаевич – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук» дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН), г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном к.ф.-м.н., доцентом, заместителем директора ОИВТ РАН Гавриковым Андреем Владимировичем отметила, что полученные результаты необходимы для углубленной разработки технологии плазмооптической масс-сепарации и достижения высокой производительности.

Соискатель имеет 5 работ по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых журналах. Наиболее значимые публикации: 1) Bardakov V. M., Ivanov S. D., Kazantsev A. V., Strokin N. A., Stupin A. N., Jiang B., Wang Z. Anomalous acceleration of ions in a plasma accelerator with an anodic layer // Plasma Science and Technology. – 2018. – V. 20. – N 3. P. 035501. 2) Bardakov V. M., Ivanov S. D., Kazantsev A. V., Strokin N. A., Stupin A. N. On performance capacity of plasma optical mass separator // Physics of Plasmas. – 2018. – V. 25. – N 8. – P. 083509. 3) Бардаков В. М., Казанцев А. В., Строкин Н. А., Ступин А. Н. Источник ионов для плазмо-оптического масс-сепаратора // ПТЭ. – 2018. – N 4. – С. 70–74. Объем 3, 5 п.л.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы (все положительные): *Ведущая организация* – отзыв положительный. Замечания: 1) Автор не упомянул о

погрешности используемого метода измерения энергетического спектра ионов и точности полученных данных. 2) Следовало бы произвести оценку количества двухзарядных ионов. 3) При построении модели, предполагающей существование виртуального анода, автор никак не рассматривает влияние геометрии электродов разрядного промежутка. *Д.ф.-м.н. Паперный В. Л. – официальный оппонент.* Отзыв положительный. Замечания: 1) $E \times V$ разряд давно изучается различными научными коллективами в широком диапазоне параметров, необходимо пояснить, почему эффект «сверхускорения» ионов не наблюдался ранее. 2) Автору следовало провести сравнение результатов модельных расчетов, с экспериментальными данными, чтобы получить количественное обоснование модели формирования виртуального анода. Необходимо было проанализировать учет ионизирующих столкновений, в области вне анодного слоя на наблюдаемый эффект «сверхускорения» ионов. 3) На стр. 34 автор утверждает, что «... не наблюдается функций распределения по энергиям с двумя пиками, характерных для случаев регистрации ионов с разной кратностью заряда». Однако из рис. 17, 18, 19, 20, видно, что «дву- (и даже) трехгорбая» структура ионного спектра регистрируется в эксперименте. 4) Простейшие оценки концентрации ионов по данным Главы 1 дают значения порядка $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$. В тоже время, в Главе 3 приводятся значения концентрации $10^5 - 10^6 \text{ см}^{-3}$ (см. рис. 42). Необходимо пояснить такую большую разницу этих величин. 5) Следует обосновать оригинальность и необходимость включения в диссертацию процедуры вычисления интегралов. *Д.ф.-м.н. Кичигин Г. Н. – официальный оппонент.* Отзыв положительный. Замечания: 1) Во введении излишне кратко описываются основные методы и установки магнито-плазменной сепарации. 2) Физическая модель не дает однозначного значения превышения потенциала виртуального анода над потенциалом анода в режиме с аномальным ускорением ионов. Желательно было бы в построенной модели найти дополнительные физические связи между параметрами, обеспечивающими математическую связь между полным ионным током и ионным током, текущим от виртуального анода к катоду. *К. ф.-м. н. Мурахтин С. В.* Отзыв положительный. Замечание: Отсутствуют сравнительные характеристики предложенного метода

разделения элементов с результатами, полученными на подобных плазменных установках. *К. ф.-м. н. Задириев И. И.* Отзыв положительный. Замечания: 1) В формуле (1) допущена опечатка. 2) В автореферате отсутствуют экспериментальные оценки температуры электронов и плотности плазмы в разряде. Без этих данных не вполне понятно, как соотносится предположение о полной ионизации рабочего газа в анодном слое (стр. 12) с выводом о малой концентрации двухзарядных ионов. 3) В автореферате нет четко сформулированного критерия эффективности работы системы формирования потока ионов. *Д. ф.-м. н. Михалев А. В.* Отзыв положительный. Замечания: 1) При регистрации ионов использовалась трубка-коллиматор. Ее влияние на результаты измерения ионных спектров не приведено. 2) Не понятно, есть ли в эксперименте оптимальная плотность, когда через азимутатор плазма проходит без потерь, и существует ли предельное значение плотности n_{∞} (формула 6) на выходе. 3) Для новой системы формирования (рис. 9) из-за отсутствия измерений параметров плазмы в области азимутатора не полностью понятен механизм компенсации заряда ионного потока. *Д. ф.-м. н., профессор Климов Н. Н.* Отзыв положительный. Замечания: 1) Теоретическая модель аномального ускорения работает с бесконечно узким виртуальным анодным слоем, в котором заключен процесс ионизации нейтралов, что приводит к моноэнергетичности потока ионов из ускорителя. Как с этим согласовать достаточно широкий энергетический разброс по энергиям ионного потока в эксперименте. 2) Для новой системы формирования ионного потока увеличение плотности прошедшего потока, происходит всего в 3 раза. Значит ли это, что начальная концентрация ионов на входе азимутатора такова, что при ней практически реализуется максимум на графике рис. 8в? *К. ф.-м. н., доцент Смоланов Н. А.* Отзыв положительный. Замечания: 1) Обилие сокращений вызывает неудобство при чтении. 2) Почему в работе не учитывалось собственное магнитное поле разрядного тока? *К.ф.-м.н. Кирий Н. П.* Отзыв положительный, замечаний нет. *К.ф.-м.н. Веселовзоров А. Н.* Отзыв положительный. Замечаний нет. *Д.ф.-м.н., профессор Козырев А. В.* Отзыв положительный. Замечаний нет.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обусловлен тем, что они являются ведущими как в России, так и в мире специалистами в области создания приборов и разработки методов для исследования, диагностики плазмы и в вопросах магнито-плазменной масс-сепарации.

Совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований были оптимизированы режимы формирования потока ионов плазмооптического масс-сепаратора. При этом получены новые результаты:

- экспериментально установлены качественно новые закономерности ускорения ионов в зоне разряда в плазменном ускорителе;
- предложено теоретическое описание аномального ускорения ионов;
- впервые найдены ограничения на производительность плазмооптической масс-сепарации, связанные с потерей части ионного потока при его прохождении через магнитный барьер азимутатора, и разработана новая система формирования потока ионов, обеспечивающая увеличение плотности ионного потока, прошедшего через магнитный барьер азимутатора.

Теоретическая значимость проведенных исследований обоснована тем, что в ней проведена модернизация существующих математических моделей и численных методов, обеспечившая получение новых результатов по теме диссертации.

Значение полученных соискателем результатов *для практики* подтверждается тем, что в работе:

- разработана и внедрена в макете плазмооптического масс-сепаратора новая система формирования потока ионов, которая обеспечивает дополнительную компенсацию ионного потока в азимутаторе, и, как следствие, увеличивает производительность плазмооптической масс-сепарации;
- разработана и введена в систему регистрации программа обработки данных сигнала с энергоанализатора, позволяющая определять основные параметры функции распределения ионов.

Достоверность результатов исследования подтверждается воспроизводимостью экспериментальных результатов исследования в различных режимах

работы макета плазмооптического масс-сепаратора, качественным совпадением авторских результатов экспериментальных исследований и данных численного моделирования, а также сравнением с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике, в тех случаях, когда такое сравнение является обоснованным.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии соискателя в проведении теоретических, экспериментальных исследований и численных расчетов, разработке ключевых элементов экспериментальной установки, программ для численных расчетов и обработки экспериментальных данных, интерпретации результатов экспериментов.

На заседании 26 апреля 2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Ступину Алексею Николаевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человека, из них: 7 докторов физико-математических наук по специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики», 6 – по специальности 01.04.03 «Радиофизика», 8 – по специальности 01.04.05 «Оптика», участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 21, против присуждения ученой степени – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета Д 003.07
д.ф.-м.н., академик РАН

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.07
д.ф.-м.н., с.н.с.



Табанов В.Ф.

Юрин А.Н.

26.04.2019