

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.268.04,  
СОЗДАНОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» МИНИСТЕРСТВА  
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК**

аттестационное дело № \_\_\_\_\_ ,  
решение диссертационного совета от 06.11.2019 № 185

О присуждении Кулеву Тимуру Вячеславовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Источники пучков ионов твердотельных веществ на основе вакуумно-дугового и пеннинговского разрядов для экстремальных режимов ионной имплантации» по специальности 01.04.04 – физическая электроника принята к защите 27 июня 2019 г., протокол заседания № 164, диссертационным советом Д 212.268.04, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 634050, Томск, пр. Ленина, 40, приказ о создании диссертационного совета № 1030/нк от 30.12.2013.

Соискатель Кулевой Тимур Вячеславович, 1963 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Генерация и формирование пучков тяжелых ионов металлов для ускорителей с ПОКФ» защитил в 2003 году в диссертационном совете, созданном на базе Московского инженерно-физического института (государственного университета), работает в должности заместителя директора по научной работе по ускорительному направлению в Федеральном государственном бюджетном учреждении

«Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (ИТЭФ).

Диссертация выполнена в ИТЭФ.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Окс Ефим Михайлович, ТУСУР, заведующий лабораторией плазменной электроники, заведующий кафедрой физики.

Официальные оппоненты:

Гаврилов Николай Васильевич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией пучков частиц Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург;

Иванов Александр Александрович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск;

Ремнев Геннадий Ефимович, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-производственной лабораторией импульсно-пучковых, электро-разрядных и плазменных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород, в своем положительном отзыве, подписанном Скалыгой Вадимом Александровичем, доктором физико-математических наук, руководителем Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН, утвержденном Денисовым Григорием Геннадиевичем, доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН, директором ИПФ РАН, указала, что диссертация Т.В. Кулевого со-

ответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Соискатель имеет 131 опубликованную работу, в том числе 49 опубликованных работ по теме диссертации, из них 27 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, 1 патент РФ и 1 патент США, 11 публикаций в материалах международных и всероссийских научных конференций и 11 публикаций в препринтах ИТЭФ. Общий объем публикаций составляет 26,9 печатных листов, из них личный вклад автора диссертации – 16,8 печатных листов. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах в диссертации отсутствуют.

Наиболее значимые работы по диссертации:

1. Vacuum Arc Ion Source for the ITEP RFQ Accelerator / V. Batalin, Y. Volkov, T. Kulevoy, S. Petrenko // Review of Scientific Instruments. – 1994. – 65(10). – pp. 3104 - 3108. (WoS)

2. Electron-beam enhancement of the metal vapour vacuum arc ion source / V.A. Batalin A.S. Bugaev, V.A. Gushenets, A. Hershcovitch, B.M. Jonson, A.A. Kolomiets, R.P. Kuibeda, T.V. Kulevoy, E.M. Oks, V.I. Pershin, S.V. Petrenko, D.N. Seleznev, G.Yu. Yushkov // Journal of Applied Physics. – 2002. – V.92. – N.5. – pp. 2884-2889. (WoS)

3. Two approaches to electron beam enhancement of the metal vapor vacuum arc ion source / B.M. Johnson, A. Hershcovitch, A. Bugaev, V. Gushenets, E. Oks, G. Yushkov, V.A. Batalin, A.A. Kolomiets, R.P. Kuibeda, T.V. Kulevoy, V.I. Pershin, S.V. Petrenko, D.N. Seleznev // Laser and Particle beams. – 2003. – 21. – pp. 103-108. (WoS)

4. Enhancement of ion beam charge states by adding a second anode to the metal-vapor vacuum-arc ion source / T.V. Kulevoy, V.A. Batalin, A. Hershcovitch, B.M. Jonson, A.A. Kolomiets, R.P. Kuibeda, D.A. Kashinsky, V.G. Kuzmichev, V.I. Pershin, S.V. Petrenko, D.N. Seleznev, E.M. Oks // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2004. – 522. – pp. 171-177. (WoS)

5. ITEP Berna IS with additional e-beam / T.V. Kulevoy, R.P. Kuibeda, S.V. Petrenko, V.A. Batalin, V.I. Pershin, G.N. Kropachev, A. Hershcovitch, B.M. Jonson, V.I. Gushenets, E.M. Oks, H.J. Poole // Review of Scientific Instruments. – 2006. – V.77(3). – 03C110. (WoS)

6. Decaborane beam from ITEP Berna ion source / T.V. Kulevoy, S.V. Petrenko, R.P. Kuibeda, V.A. Batalin, V.A. Pershin, A.V. Kozlov, Yu.B. Stasevich, A. Hershcovitch, V.B. Johnson, E.M. Oks, V.I. Gushenets, H.J. Poole, P.A. Storozhenko, E.L. Gurkova, O.A. Alexeyenko // Review of Scientific Instruments. – 2006. – V.77(3). – 03C102. (WoS)

7. Carborane beam from ITEP Bernas ion source for semiconductor implanters / D. Seleznev G. Kropachev, A. Kozlov, R. Kuibeda, V. Koshelev, T. Kulevoy, A. Hershcovitch, B. Jonson, J. Poole, O. Alexeyenko, E. Gurkova, E. Oks, V. Gushenets, S. Polozov, and E. Masunov // Review of Scientific Instruments. – 2010. – V.81. – 02B901. (WoS)

8. Molecular ion sources for low energy semiconductor ion implantation / A. Hershcovitch, V.I. Gushenets, D.N. Seleznev, A.S. Bugaev, S. Dugin, E.M. Oks, T.V. Kulevoy, O. Alexeyenko, A. Kozlov, G.N. Kropachev, R.P. Kuibeda, S. Minaev, A. Vizir, and G.Yu. Yushkov // Review of Scientific Instruments. – 2016. – 87. – 02B702. (WoS)

9. Имитационный эксперимент по изучению радиационной стойкости перспективной ферритно-мартенситной стали, упрочненной дисперсными включениями / С.В. Рогожкин, Т.В. Кулевой, Н.А. Искандаров, Н.Н. Орлов, Б.Б. Чалых, А.А. Алеев, Н.Ю. Грачев, Р.П. Куйбида, А.А. Никитин, А.Д. Фертман, В.Б. Шишмарев // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114. – стр. 12-16

10. Simulation of irradiation effects with ions on the RFQ linac HIPr / P.A. Fedin, M.S. Saratovskikh, R.P. Kuibeda, A.L. Sitnikov, T.V. Kulevoy, A.A. Nikitin, and S.V. Rogozhkin // 6th International Congress “Energy Fluxes and Radiation Effects, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1115 – 2018. – 032026.

На диссертацию и автореферат поступило 10 отзывов, все отзывы положительные:

1) Отзыв на автореферат из Объединенного института ядерных исследований, подписанный академиком РАН, доктором физико-математических наук, профессором Шарковым Борисом Юрьевичем, вице-директором института. Имеется замечание:

«Малый размер ряда графиков с результатами измерения спектров, генерируемых ионных пучков, затрудняет их восприятие».

2) Отзыв на автореферат из Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», подписанный доцентом кафедры полупроводников Института новых материалов и нанотехнологий НИТУ «МИСИС», доктором технических наук Лаговым Петром Борисовичем. Замечаний нет.

3) Отзыв на автореферат из Государственного научного центра Российской Федерации Акционерного общества «Государственный Орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементо-органических соединений» (ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС»), подписанный членом-корреспондентом РАН, доктором химических наук, профессором Стороженко Павлом Аркадьевичем, генеральным директором института. Имеется замечание:

«В автореферате присутствует ряд досадных опечаток, как в тексте, так и в приведённых схемах; на отдельных рисунках не указаны размеры или не приведён масштаб, что в некоторой степени затрудняет восприятие иллюстративного материала».

4) Отзыв на автореферат из Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет», подписанный заведующим кафедрой общей и космической физики физического факультета профессором, доктором физико-математических наук Паперным Виктором Львовичем. Имеются замечания:

«1. Автор оперирует термином «ионные источники с экстремальными параметрами пучка», по-видимому, имея в виду повышенный зарядовый состав ионных пучков, генерируемых разработанными оригинальными вакуумно-дуговыми плазменными источниками. Предложенные автором методы повышения зарядности ионов позволили увеличить ее в 1.5 – 1.7 раза. Вместе с тем, уже около 20 лет

известны быстрые импульсные вакуумные разряды, где среднюю зарядность ионов удалось повысить в 4-5 раз, а в недавних работах сотрудников ИСЭ СО РАН это увеличение достигло почти 10. Поэтому употребление термина «экстремальные параметры» в данном случае считаю неуместным.

2. В качестве практической ценности проведенных исследований автор заявляет, что «Увеличение среднего заряда генерируемых ионных пучков позволяет сократить энергопотребление и размеры установок». Этот вывод, в принципе, не вызывает сомнений, однако его следовало подкрепить конкретными оценками и расчетами».

5) Отзыв на автореферат из Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», подписанный профессором кафедры Электронных приборов и устройств доктором технических наук, профессором Кузьмичевым Анатолием Ивановичем. Имеются замечания:

«1. Автор пишет о проведении работ по оптимизации параметров ионного источника, но не указывает, в чем они заключались? Не приводятся количественные данные об оптимальных соотношениях параметров плазмообразующих разрядов (вакуумной дуги и пеннинговского разряда) и параметров внешних электронных пучков, инжектируемых в плазму этих разрядов.

2. Замечания к оформлению автореферата. Рисунки 6 и 7 малоинформативны, лучше увеличить за их счет размеры рисунков 2 и 5».

6) Отзыв на автореферат из Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Северо-Кавказский федеральный университет, подписанный профессором кафедры электроники и нанотехнологий, доктором технических наук Мартенсом Владимиром Яковлевичем. Замечаний нет.

7) Отзыв на автореферат из Линчепингского университета (Линчепинг, Швеция), подписанный доцентом кафедры физики, химии и биологии кандидатом технических наук Жирковым Игорем Сергеевичем. Имеются замечания:

«1. Недостаточное описание процессов создания прототипов источников ионов и обозначения физических процессов, сопровождающих то или иное изменение конструкции/геометрии. К примеру, в работе указано, что зарядовый состав результирующего ионного пучка возрастает при инжекции электронного пучка в плазму. Однако возрастание среднего заряда плазмы при ее нагреве электронным пучком довольно известный феномен. Уверен, что такое описание есть, но в автореферате указано лишь наличие оригинальной конструкции и некой оптимизации. То же самое можно сказать и о возрастании среднего заряда плазмы при ее сжатии магнитным полем.

2. Среди менее важных замечаний можно отметить слишком маленькие изображения конструкций разработанных источников и наличие таких странных выражений как, например, «пучки твердотельных ионов».

8) Отзыв на автореферат из Национального исследовательского Томского государственного университета, подписанный профессором кафедры физической и коллоидной химии химического факультета, доктором физико-математических наук Курзиной Ириной Александровной. Замечаний нет.

9) Отзыв на автореферат из Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики, подписанный директором Института радиационной и ядерной физики доктором физико-математических наук Завьяловым Николаем Валентиновичем и заместителем директора Института радиационной и ядерной физики, начальником отделения кандидатом физико-математических наук Тельновым Александром Валентиновичем. Замечаний нет.

10) Отзыв на автореферат из Национального исследовательского университета МИЭТ, подписанный начальником лаборатории «Радиационных методов технологии и анализа» доктором физико-математических наук, профессором, заслуженным работником высшей школы Российской Федерации Герасименко Николаем Николаевичем. Замечаний нет.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью, широкой известностью своими достижениями в области физи-

ки газового и вакуумно-дугового разрядов и низкотемпературной плазмы, включая технологические применения пучков заряженных частиц и плазмы, наличием публикаций в соответствующей сфере исследований и способностью определить научную и практическую ценность диссертации, а также дать рекомендации по использованию в ней полученных результатов.

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны** методы повышения средней зарядности пучка тяжелых ионов в результате инъекции ускоренного пучка электронов в плазму дугового разряда и в плазму пеннинговского разряда, а также в результате реализации ступенчатого дугового разряда в нарастающем магнитном поле; методы генерации пучков многоатомных борсодержащих молекулярных ионов в источнике на основе пеннинговского разряда;

**предложены** оригинальные технические решения для конструкций ионных источников на основе вакуумно-дугового разряда, приводящие к повышению зарядности генерируемых в нем ионов;

**доказана** перспективность использования режима генерации пучка многоатомных борсодержащих молекулярных ионов с непрерываемой самоочисткой электродов разрядной камеры и системы формирования пучка в пеннинговском источнике ионов;

**введены** новые термины: ионные источники для экстремальных режимов имплантации и ступенчатый дуговой разряд в нарастающем магнитном поле.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что:

**доказаны** роль высокоэнергетичных электронов, инжектируемых в плазму вакуумно-дугового и пеннинговского разрядов, в нагреве плазмы, и, соответственно, в увеличении среднего заряда ионов; перспективность создания магнитного поля в ступенчатом вакуумно-дуговом разряде для повышения зарядового состояния ионов плазмы разряда;

**применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использован**



метод численного моделирования плазмы пеннинговского разряда, системы формирования и транспортировки пучков ионов;

**изложены** причинно-следственные связи влияния атомов активных окислителей на обеспечение режима непрерываемой самоочистки разрядной камеры от продуктов диссоциации рабочего вещества при генерации пучка многоатомных борсодержащих молекулярных ионов в пеннинговском разряде;

**раскрыто** противоречие между количеством атомов активных окислителей в составе многоатомной борсодержащей молекулы рабочего вещества и достижением эффекта самоочистки разрядной камеры;

**изучены** возможности повышения зарядового состояния ионов вакуумно-дугового и пеннинговского разрядов при инжекции в них пучка высокоэнергетичных электронов;

**проведена модернизация** общепринятой физической модели устойчивой генерации пучков многоатомных борсодержащих молекулярных ионов в источниках на основе пеннинговского разряда в режиме самоочистки электродов разрядной камеры.

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

**разработаны и внедрены** методы повышения среднего и максимально достижимого заряда ионов как в плазме вакуумно-дугового разряда источника для ускорителя тяжелых ионов ТИПр в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, так и пеннинговского разряда в ионных источниках, используемых для высокоэнергетической ионной имплантации в полупроводниковой промышленности;

**определены** перспективы использования источников ионов металлов для ускорителей заряженных частиц при проведении имитационных экспериментов по экспресс-анализу радиационной стойкости конструкционных материалов ядерной и термоядерной энергетики;

**создана** система практических рекомендаций по генерации пучков многоатомных борсодержащих молекулярных ионных пучков для использования в полупроводниковой промышленности, необходимых для обеспечения технологиче-

ских норм менее 40 нм, а также экспериментальная база, включающая ряд уникальных исследовательских установок ионного облучения и имплантации, а именно: ускоритель ТИПр, установки СОРМАТ и УСИ, что открыло возможности для широкого круга материаловедческих исследований, а также для проведения работ по фундаментальному исследованию процессов взаимодействия ионного пучка с энергией 101 кэВ/нуклон с плазменной и газовой мишенью, для которых на сегодняшний день нет точного теоретического описания;

**представлены** методические рекомендации по способам и режимам организации самоочистки разрядной камеры источника на базе пеннинговского разряда от продуктов фрагментации рабочего вещества при генерации пучков многоатомных борсодержащих молекулярных ионов, которые позволяют полностью исключить негативное влияние продуктов диссоциации многоатомных борсодержащих молекул на качество ионного пучка и на время непрерывной работы источника.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ:** результаты характеризуются совпадением экспериментальных данных с результатами численного моделирования и теоретическими оценками, а также практической реализацией полученных научных положений и выводов при создании ионных источников и их применении;

**теория** экстракции ионов из плазмы, формирования, транспортировки и фокусировки ионных пучков в области поперечного магнитного поля согласуется с экспериментальными результатами, полученными в диссертации;

**идеи базируются** на анализе практики и обобщении результатов исследований ионных источников на основе вакуумно-дугового и пеннинговского разрядов;

**использованы** сравнения авторских данных и данных, полученных ранее другими авторами, по исследованию и разработке ионных источников на основе вакуумно-дугового и пеннинговского разрядов;


**установлено** качественное совпадение полученных соискателем результатов с литературными данными, опубликованными в независимых источниках;

**использованы** апробированные экспериментальные методики измерения магнитным масс-анализатором масс-зарядового распределения ионов в пучках, генерируемых ионными источниками на основе вакуумно-дугового и пеннинговского разрядов, обеспечивающие получение достоверных результатов.

**Личный вклад соискателя состоит в:** постановке задач исследований, проведении экспериментов и анализе полученных результатов, а также в разработке основных конструктивных решений, используемых в экспериментальных макетах и устройствах. Автором работы выдвинуты идеи создания источников e-MEVVA и MEVVA-M, метода повышения зарядового состояния в источнике с пеннинговским разрядом, источника многоатомных борсодержащих молекулярных ионов, определены и оптимизированы режимы работы этих устройств. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично. Соавторы, принимавшие участие в исследованиях, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации.

На заседании 06 ноября 2019 г. диссертационный совет принял **решение присудить** Кулевому Тимуру Вячеславовичу ученую степень **доктора технических наук**.

При проведении **тайного голосования** диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 8 докторов наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – 1, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета Д 212.268.04  
доктор физико-математических наук, профессор  Шандаров С.М.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.268.04  
доктор технических наук, профессор  Акулиничев Ю.П.

06 ноября 2019 года

