

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по НРИ  
Томского государственного  
университета систем управления и  
радиоэлектроники



В.А. Рулевский

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Диссертация «Генерация форвакуумным плазменным источником электронов сфокусированных непрерывных пучков для обработки диэлектрических материалов» выполнена на кафедре физики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

В период подготовки диссертации соискатель Бакеев Илья Юрьевич обучался в очной аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Во время обучения в аспирантуре Бакеев И.Ю. совмещал научную и педагогическую деятельность. В настоящее время он работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории плазменной электроники кафедры физики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Научный руководитель – Окс Ефим Михайлович, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра физики, зав. кафедрой физики, д.т.н., профессор.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

### **Оценка выполненной соискателем работы.**

Диссертация Бакеева Ильи Юрьевича является научно-квалификационной работой, в которой представлены результаты решений, имеющих важное значение научной проблемы создания нового поколения форвакуумных плазменных электронных источников, обеспечивающих генерацию сфокусированных непрерывных электронных пучков с рекордными параметрами пучка: максимальной плотностью мощности и минимальным диаметром пучка, обеспечивающими новые функциональные возможности электронно-лучевой обработки высокотемпературных диэлектриков.

### **Актуальность темы и направленность исследования**

Активно развиваемые в последнее время так называемые форвакуумные плазменные источники электронов, функционирующие в области давлений от единиц до сотни паскалей, позволяют производить непосредственную электронно-лучевую обработку диэлектрических материалов (керамика, стекло и др.) без использования дополнительного оборудования для снятия заряда с обрабатываемой поверхности диэлектрика. Задача формирования сфокусированных электронных пучков плазменными источниками в форвакуумной области давлений, в первую очередь, осложнена процессами рассеяния электронов на молекулах рабочего газа и другими особенностями, связанными с генерацией пучка в форвакуумной области давлений, к примеру, наличием обратного ионного потока в ускоряющем промежутке. Так как повышение качества обработки диэлектриков требует дальнейшего увеличения удельной мощности электронного пучка, проблема дальнейшего повышения удельных параметров электронного пучка, генерируемого плазменным источником в форвакуумной области давлений, представляется актуальной.

### **Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации**

Все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично. Автором лично определены задачи, решаемые в работе, выбраны методики эксперимента и произведен анализ полученных в ходе экспериментов результатов. В постановке отдельных задач исследований и обсуждений результатов анализа экспериментальных данных активное участие принимали научный руководитель Е.М. Окс, а также В.А. Бурдовицин и А.С. Климов. Все эксперименты проводились автором самостоятельно. Автором самостоятельно разработаны модели, представленные в работе, и на их основе произведены расчеты. Автором самостоятельно были выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы и составлены рекомендации, на основании которых произведена



модернизация конструкции форвакуумного источника сфокусированного непрерывного пучка, применяемого для прецизионной обработки диэлектрических материалов.

### **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых экспериментальных методик, соответствием экспериментальных результатов с численными оценками, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании и применении форвакуумного источника непрерывного сфокусированного пучка.

### **Научная новизна диссертации**

заключается в том, что для форвакуумных плазменных источников электронов впервые:

1. Определены условия, обеспечивающие максимальную плотность эмиссионной плазмы на оси разрядной системы с полым катодом в отсутствие перепада давления между разрядной областью и областью ускорения электронного пучка, что обеспечивает повышение плотности эмиссионного тока через центральный эмиссионный канал в эмиссионном электроде до  $10 \text{ А/см}^2$ .

2. Определена роль и степень влияния геометрии эмиссионных каналов, конфигурации ускоряющего промежутка, а также фокусирующей магнитной системы на удельные параметры электронного пучка при давлениях рабочего газа 10-30 Па.

3. Предложены оригинальные технические решения, обеспечивающие повышение плотности мощности электронного пучка плазменного источника с магнитной фокусировкой в области повышенных давлений форвакуумного диапазона, до уровня  $10^6 \text{ Вт/см}^2$ .

### **Практическая значимость диссертации.**

1. Результаты проведенных исследований вносят существенный вклад в понимание физических процессов генерации сфокусированных электронных пучков плазменными источниками с полым катодом, функционирующими в области повышенных давлений газа форвакуумного диапазона. Определены условия, позволяющие улучшить магнитную фокусировку электронного пучка и, тем самым, повысить его удельные параметры.

2. Создан опытный образец форвакуумного плазменного источника электронов с двойной магнитной фокусирующей системой, обеспечивающий

при давлениях рабочего газа вплоть до 30 Па генерацию электронного пучка с плотностью мощности  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

3. Продемонстрирована возможность применения форвакуумного источника сфокусированного электронного пучка для селективного электронно-лучевого спекания керамических порошков, а также резки высокотемпературных диэлектрических материалов на глубину до нескольких сантиметров.

4. Результаты работы могут быть использованы в других плазменно-эмиссионных приборах, функционирующих в области повышенных давлений форвакуумного диапазона и имеющих аналогичные разрядные и эмиссионные системы.

5. Результаты исследований использованы при выполнении работ по 3-м проектам, поддержанным грантами Российского фонда фундаментальных исследований №№ 15-08-00871 а и РФФИ 17-08-00239, в которых соискатель является исполнителем, а также РФФИ 18-38-00305 мол\_а, руководителем которого является соискатель; по проектам в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ №№ № 3.9605.2017/8.9, № 11.1550.2017/4.6. Также работы поддержаны стипендиями Правительства и Президента РФ для аспирантов (2017; 2017-2018; 2018-2019 гг.).

6. Разработанные в результате выполнения работы технические решения защищены 2- Патентами РФ, получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ.

#### **Полнота изложения материалов диссертации в печатных работах, опубликованных автором**

Результаты работ опубликованы в 4 статьях в российских изданиях, входящих в Перечень ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, а также учитываемых в этом перечне 3 статьях в зарубежных изданиях, индексируемых в базах данных научного цитирования Web of Science и Scopus. Результаты исследований по диссертационной работе также опубликованы в виде 17 полнотекстовых докладов в сборниках конференций Международного и Всероссийского уровней, 5 из которых опубликованы в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus.

Результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях:

Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2016, 2017, 2018 гг.); Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2016» (г. Томск, 2016, 2017, 2018



гг.); Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 2016, 2017, 2018 гг.); VI Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (г. Москва, 2016 г.); International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2016, EFRE-2018) (г. Томск, 2016, 2018 гг.); XIII Международная конференция «Газоразрядная плазма и ее применение» (г. Новосибирск, 2017 г.); Двадцать четвертая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-24 (г. Томск, 2018 г.); VI Международный Крейнделевский семинар «Плазменная эмиссионная электроника» (г. Улан-Удэ, 2018 г.).

### Список работ, опубликованных по теме диссертации:

#### **Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:**

1. О возможности прецизионной электронно-лучевой обработки протяженных диэлектрических изделий плазменным источником электронов в форвакууме / И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин, А.С. Климов, Е.М. Окс // Прикладная физика. – 2017. - №3. – С. 26-30.
2. О распределении тепловых полей при электронно-лучевой обработке кварцевого стекла плазменным источником электронов / И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин, А.С. Климов, Е.М. Окс // Прикладная физика. – 2018. – Т.21, № 2.
3. Generation of high power density electron beams by a forevacuum-pressure plasma-cathode electron source / I. Bakeev, A. Klimov, E. Oks, A. Zenin // Plasma Sources Science and Technology. – 2018. – Vol. 27. – Issue 7. –P. 075002.
4. Double-coil magnetic focusing of the electron beam generated by a plasma-cathode electron source / I.Yu. Bakeev, A.S. Klimov, E.M. Oks, A.A. Zenin // Rev. Sci. Instrum. – 2019. – Vol. 90. – P. 023302.
5. Forevacuum plasma source of continuous electron beam / A.S. Klimov, I.Yu. Bakeev, E.M. Oks, A.A. Zenin // Laser and Particle Beams. – 2019. (<https://doi.org/10.1017/S0263034619000375>).
6. Composition of the gas atmosphere during the electron beam interaction with the alumina powder in the forevacuum pressure range / I.Yu. Bakeev, A.A. Zenin, Tyun'kov A.V., A.S. Klimov // Доклады ТУСУРа. – 2016 – Том 19, № 4. – С. 13-16.
7. Бакеев И. Ю. Влияние формы ускоряющего электрода в форвакуумном плазменном источнике на предельные параметры фокусировки электронного пучка / И. Ю. Бакеев, А. С. Климов // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 47–50.

### **Статьи в сборниках, индексируемых в базах Scopus и Web of Science:**

8. The possibilities of dimensional electron-beam processing as applied to selective sintering of oxide ceramics in the forevacuum pressure range / I.Yu. Bakeev, E.S. Dvilis, A.S. Klimov, E.M. Oks, A.A. Zenin // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – No. 945. – P. 012016.

9. Generation of an electron beam by the forevacuum plasma source with a single emission channel / I.Yu. Bakeev, A.S. Klimov, E.M. Oks, A.A. Zenin // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – No. 1115. – P. 032001.

10. Narrow-aperture electron beam in the forevacuum pressure range as a tool for dimensional processing of silica glass / A. Zenin, A. Klimov, I. Bakeev // MATEC Web of Conferences. – 2018. – No. 143. – P. 03006.

11. Electron-beam synthesis of graded metal-ceramic materials in the forevacuum pressure range / A.S. Klimov, I.Yu. Bakeev, A.A. Zenin // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – No. 1115. – P. 032037.

12. Forevacuum Plasma Electron Source for Dielectric Surface Treatment / A. Zenin, I. Bakeev, Y. Burachevsky, A. Klimov, E. Oks, Y. Yushkov // 2018 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE). – IEEE, 2018. – С. 43-45.

### **Статьи в сборниках трудов конференций, индексируемых в РИНЦ:**

13. Bakeev I.Yu. Electron-beam Sintering in the Forevacuum Pressure Range of Zirconia and Alumina Powders without Pressing // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XII Международной научно-практической конференции (16–18 ноября 2016 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2016. – С. 206-208.

14. Бакеев И.Ю. Фокусировка электронного пучка, генерируемого плазменным источником в форвакуумной области давлений / И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин // Современные проблемы физики и технологий. VI-я Международная молодежная научная школа-конференция (21 апреля 2017 г.): Тезисы докладов. Часть 1. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. – С. 296А-296Б.

15. Бакеев И.Ю. Применение двойной фокусирующей катушки для получения остросфокусированного пучка электронов в диапазоне давлений 10-30 Па / И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин // Прогрессивные технологии и процессы: Сборник научных статей 4-й Международной молодежной научно-технической конференции (21-22 сентября 2017 г.). – Курск: Из-во «Университетская книга», 2017. – С. 21-25.



16. Бакеев И.Ю. Влияние формы катодной полости на эффективность извлечения электронного пучка через одиночный эмиссионный канал в форвакуумной области давлений // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 3 частях. – Томск: В-Спектр, 2018 – Ч. 2. – С.79-82.

17. Ким В.С. Параметры электронного пучка, генерируемого через одиночный эмиссионный канал плазменного источника в форвакуумной области давлений / В.С. Ким, И.Ю. Бакеев // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 3 частях. – Томск: В-Спектр, 2018 – Ч. 2. – С.82-85.

#### **Патенты, свидетельства о регистрации программного продукта:**

18. Патент РФ на изобретение № 2627796 «Способ послойного электронно-лучевого спекания изделий из керамического порошка», Бакеев И.Ю., Бурачевский Ю.А., Бурдовицин В.А., Зенин А.А., Климов А.С., Окс Е.М., 2017.

19. Патент РФ на полезную модель № 183652 «Приспособление для электронно-лучевой сварки труб из стекла», Бакеев И.Ю., Бурдовицин В.А., Зенин А.А., Климов А.С., Окс Е.М., Фролова В.П., 2018.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615917 «Определение параметров плазмы по зондовой характеристике», Бакеев И.Ю., Климов А.С., Андрейчик А.П., Зенин А.А., 2016.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661102 «Расчет диаметра электронного пучка по осциллограмме», Бакеев И.Ю., Зенин А.А., Медовник А.В., 2017.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661019 «Расчет распространения плазмы в эмиссионном канале форвакуумного источника электронов», Климов А.С., Бакеев И.Ю., Юшков Ю.Г., 2018.

#### **Соответствие содержания диссертации избранной специальности**

Диссертационная работа Бакеева Ильи Юрьевича по своему содержанию соответствует специальности 01.04.04 – Физическая электроника в области исследований «Эмиссионная электроника, включая процессы на поверхности, определяющие явления эмиссии, эмиссионную спектроскопию и все виды эмиссии заряженных частиц» (п. 1 паспорта специальности); «Вакуумная электроника, включая методы генерирования потоков заряженных частиц, электронные и ионные оптические системы, релятивистскую электронику» (п. 3 паспорта специальности); «Плазменная электроника, включая физические процессы в плазменных электронных приборах: СВЧ-генераторах,

усилителях, плазменных (коллективных) ускорителях, плазменно-пучковых разрядах» (п. 5 паспорта специальности); «Изучение физических основ плазменных и лучевых (пучковых) технологий, в том числе модификации свойств поверхности, нанесение тонких пленок и пленочных структур» (п. 6 паспорта специальности).

Диссертация «Генерация форвакуумным плазменным источником электронов сфокусированных непрерывных пучков для обработки диэлектрических материалов» Бакеева Ильи Юрьевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Заключение принято на заседании научного семинара кафедры «Физики», с привлечением специалистов кафедр «Электронные приборы», «Физическая электроника», а также научных сотрудников лаборатории плазменных источников и лаборатории плазменной эмиссионной электроники института сильноточной электроники СО РАН.

Присутствовало на заседании 28 чел., в том числе докторов наук – 8, кандидатов наук – 15. Результаты голосования: «за» – 28 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 27 от « 30 » 05 2019 г.

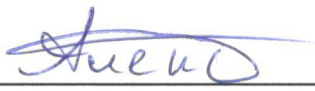
Заведующий кафедрой:  
Доктор технических наук, профессор, заведующий каф. физики ТУСУР



Окс Ефим Михайлович

(Подпись)

Секретарь семинара:  
Кандидат технических наук, начальник научного управления ТУСУР, доцент каф. физики ТУСУР



Медовник Александр Владимирович

(Подпись лица, оформившего заключение)