

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.243.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»,
МИНОБРНАУКИ РОССИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 18.12.2020 № 116

О присуждении Бадарину Артему Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Колебательные явления в релятивистских электронных потоках с виртуальным катодом в полях резонансных систем и фотонных кристаллов» по специальностям 01.04.03 – «Радиофизика» и 01.04.04 – «Физическая электроника» принята к защите 07 октября 2020 г. (протокол № 111) диссертационным советом Д 212.243.01, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»), Минобрнауки России, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, приказ Минобрнауки России о создании диссертационного совета от 15.02.2013 № 75-нк; приказы об изменении состава совета от 15.12.2015 № 1598/нк-9, от 28.09.2016 № 1180/нк-52, от 15.02.2017 № 116/нк-38, от 26.01.2018 № 92/нк-50, от 17.04.2018 № 431/нк-26, от 23.11.2018 № 301-нк-66, от 24.09.2019 №873/нк-26.

Соискатель Бадарин Артем Александрович, 1993 года рождения, в 2017 году окончил ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» с присвоением квалификации магистра по направлению подготовки 03.04.01 «Прикладные математика и физика», работает младшим научным сотрудником Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники в автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис» (АНО ВО «Университет Иннополис»).

Диссертация выполнена в Центре технологий компонентов робототехники и мехатроники, АНО ВО «Университет Иннополис».

Научные руководители – доктор физико-математических наук, доцент Куркин Семён Андреевич, АНО ВО «Университет Иннополис», Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Лаборатория нейронауки и когнитивных технологий, профессор;

доктор физико-математических наук, профессор Храмов Александр Евгеньевич, АНО ВО «Университет Иннополис», Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Лаборатория нейронауки и когнитивных технологий, руководитель лаборатории.

Официальные оппоненты:

1. Комаров Дмитрий Александрович, доктор технических наук (05.27.02), доцент, АО «Научно-производственное предприятие «Горий»» (г. Москва), заместитель генерального директора – директор по научной работе;
2. Малкин Андрей Михайлович, кандидат физико-математических наук (01.04.03), ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород), лаборатория пространственно-развитых генераторов и усилителей, старший научный сотрудник,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз» (г. Саратов) в своем положительном заключении, подписанном Рафаловичем Александром Давидовичем, к.т.н. (05.27.02), заместителем директора по научной работе НПЦ «Электронные системы», и Архиповым Данилой Алексеевичем, к.т.н. (05.27.02), ученым секретарем секции НТС, начальником тематического отдела НПЦ «Электронные системы», указали, что диссертация Бадарина А.А. представляет собой законченное научное исследование на стыке современной радиофизики и физической электроники, результаты работы носят научно-прикладной характер, открывая новые возможности для конструкторской деятельности в области высокомоощной вакуумной электроники. Содержание диссертации соответствует паспортам специальностей 01.04.03 – «Радиофизика» и 01.04.04 – «Физическая электроника». Автореферат полно и правильно отражает ее содержание. Работа удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Бадарин Артем Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – «Радиофизика» и 01.04.04 – «Физическая электроника».

Соискатель имеет 47 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 47 работ общим объемом 11.0625 п.л. (авторский вклад 3.6 п.л.), из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 12 работ. Список публикаций также включает главу в коллективной монографии, 27 работ в сборниках трудов всероссийских и международных конференций, из них 12 работ, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, и 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Badarin, A. A.**, Kurkin, S. A., Frolov, N. S., Koronovskii, A. A., Hramov, A. E., Rak, A. O. Higher-order modes excitation in generator with photonic crystal // Results in Physics. – 2019. – Vol. 15. – P. 102758.
2. **Badarin, A. A.**, Kurkin, S. A., Koronovskii, A. A., Hramov, A. E., Rak, A. O. Processes of virtual cathodes interaction in multibeam system // Physics of Plasmas. – 2018. – Vol. 25. – No. 8. – P. 083110.
3. **Бадарин, А. А.**, Куркин, С. А., Фролов, Н. С., Сельский, А. О., Храмов, А. Е., Короновский, А. А. Анализ сложных динамических режимов в различных модификациях релятивистских генераторов на виртуальном катоде // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2018. – Т. 82. – No. 11. – С. 1595-1600.
4. **Бадарин, А. А.**, Куркин, С. А., Храмов, А. Е. Мультистабильность в релятивистском электронном потоке со сверхкритическим током // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2015. – Т. 79. – No. 12. – С. 1646-1649.
5. Kurkin, S. A., **Badarin, A. A.**, Koronovskii, A. A., Hramov, A. E., Rak, A. O. Higher harmonics generation in relativistic electron beam with virtual cathode // Physics of Plasmas. – 2014. – Vol. 21. – No. 9. – P. 093105.

На автореферат поступило 7 положительных отзывов: из Научно-производственного центра физики ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» от Дубинова А.Е., д.ф.-м.н. (01.04.02); из Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского от Осипова Г.В., д.ф.-м.н. (01.04.03); из ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» от Лукши О.И., д.ф.-м.н. (01.04.04); из ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» от Старостенко В.В., д.ф.-м.н. (01.04.07); из Университета Лафборо (г. Лафборо, Великобритания) от Баланова А.Г., к.ф.-м.н. (01.04.03); из ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» от Пойзнера Б.Н., к.ф.-м.н. (01.04.03), профессора, и Измайлова И.В., к.ф.-м.н. (01.04.05); из Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН от Селезнева Е.П., д.ф.-м.н. (01.04.03).

В отзывах сделаны замечания об отсутствии в автореферате: данных о спектре выходного излучения и его мощности для виркаторной системы с тремя электронными пучками; пояснений о том, учтен ли релятивистский фактор в формуле для плазменной частоты пучка и в каком сечении она вычислялась; выводов о возможности достижения совокупного эффекта увеличения КПД устройств с виртуальным катодом с помощью проанализированных в работе способов; описания роли электронов, отраженных от виртуального катода и затем повторно отраженных от катода; обозначений величин и единиц измерения на рис. 1 и 2; также содержатся замечания редакционного характера.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в научной тематике, к которой относится диссертация, что подтверждается наличием публикаций в ведущих рецензируемых научных изданиях, а также отсутствием совместных с соискателем печатных работ.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

установлено, что переключение основной частоты генерации в электронном пучке с виртуальным катодом обусловлено неравномерным отражением электронов по радиусу пучка и наличием характерных зон генерации;

предложены:

оригинальная схема виркатора, в которой эллиптический резонатор используется в качестве пространства взаимодействия, что позволяет увеличить эффективность энергообмена между электромагнитным полем и электронным потоком с виртуальным катодом;

оригинальная схема многолучевого релятивистского виркатора, в которой несколько электронных потоков со сверхкритическими токами нагружены на общую электродинамическую структуру в виде отрезка цилиндрического волновода;

оригинальная высокоэффективная схема двухсекционного виркатора на базе фотонного кристалла;

обнаружен новый эффект подстройки частоты колебаний виртуальных катодов в электронных потоках с меньшими токами к частоте колебаний виртуального катода в электронном потоке с большим током за счет связи через общее электромагнитное поле;

установлено, что возрастание электронного КПД в двухсекционном виркаторе связано с тем, что в нем имеет место распределённая обратная связь, реализующаяся с помощью электромагнитного поля внутри фотонного кристалла и за счет предварительной модуляции пучка, в котором формируется виртуальный катод во второй секции системы;

доказана перспективность использования нескольких электронных потоков и фотонных кристаллов в генераторах на базе виртуального катода.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

изложены причины скачкообразного переключения основной частоты генерации в виркаторных схемах;

раскрыты закономерности взаимодействия нескольких электронных потоков с виртуальным катодом в едином пространстве дрейфа;

изучены особенности селекции мод в фотонном кристалле и их взаимодействие с виртуальным катодом.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использован** комплекс современных методов нелинейной динамики, методов численного моделирования, получивших широкое распространение при моделировании компонентов систем с интенсивными электронными потоками:

изложены особенности возбуждения собственных мод эллиптического резонатора с помощью интенсивного электронного потока с виртуальным катодом;

выявлены процессы, ответственные за переключение режимов генерации в многолучевой модели виркатора, обусловленные взаимодействием потоков с виртуальными катодом;

доказана возможность синхронизации нескольких виртуальных катодов в едином пространстве дрейфа;

изучена специфика процессов взаимодействия электронного потока с виртуальным катодом в оригинальной модели двухсекционного виркатора с фотонным кристаллом, заключающаяся в наличии распределённой обратной электромагнитной связи внутри фотонного кристалла.

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

представлены рекомендации по увеличению КПД генераторов на виртуальном катоде за счет использования нескольких электронных потоков, связанных через общее электромагнитное поле;

созданы новые виркаторные схемы на базе эллиптического резонатора и фотонного кристалла, позволяющие уменьшить недостатки, свойственные данному классу устройств (сравнительно низкие КПД и частота генерации);

определены наиболее эффективные режимы, с точки зрения энергообмена между релятивистским электронным потоком с виртуальным катодом и модами внешнего резонатора;

определены основные параметры новой модели виркатора с электродинамической структурой в виде эллиптического резонатора, такие как геометрические размеры системы, энергия и ток инжектируемого электронного потока, генерируемая выходная мощность и КПД;

представлены карты характерных режимов генерации от токов электронных пучков, реализующихся при взаимодействии трех электронных потоков со сверхкритическими токами в многолучевом релятивистском виркаторе.

Полученные в диссертационной работе результаты были использованы при выполнении научных задач по следующим НИР: государственные задания №3.59.2014/К и №3.859.2017/ПЧ, Грант Президента РФ № МК-1163.2017.2, грант Российского научного фонда № 14-12-00222, гранты Российского фонда фундаментальных исследований № 14-02-31204, № 15-32-20299, № 15-52-04018, № 17-52-04097.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что

идея базируется на современных теоретических представлениях и экспериментальных результатах в области изучения взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями резонансных систем и фотонных кристаллов;

использованы математические методы и подходы численного моделирования, которые апробированы и хорошо себя зарекомендовали при проведении научных исследований в области высокоомощной вакуумной электроники;

установлено качественное и количественное соответствие полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными (значения частот генерации, токов электронных потоков и характеристики электродинамических систем), опубликованными в отечественных и зарубежных высокорейтинговых научных изданиях;

использованы современные технологии сбора и обработки информации при проведении численных расчетов и представлении результатов.

Личный вклад соискателя. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором: выбор методик решения задач, написание программ для ЭВМ, реализующих используемые в работе численные методы, графическая обработка и анализ результатов расчетов. Постановка задач, обсуждение и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научными руководителями.

Результаты работы открывают новые возможности для конструкторской деятельности в области радиофизики и физической электроники сантиметрового и миллиметрового диапазонов, актуальных для систем дальней радиолокации, дистанционного зондирования атмосферы, спутниковой связи, ускорения электронных и ионных пучков. Результаты работы рекомендуются к использованию в научных и производственных организациях, занимающихся исследованием физических явлений в релятивистских электронных потоках и разрабатывающих новые электронные приборы высокоомощной релятивистской электроники: в АО НПП «Алмаз», г. Саратов; в НПЦФ ФГУП РФЯЦ Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров; в АО НПП «Торий», г. Москва; в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал; Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород; Объединенном институте ядерных исследований, г. Дубна, в Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, а также в высших учебных заведениях, ведущих подготовку специалистов по направлениям 01.04.03 – радиофизика и 01.04.04 – физическая электроника. (Новосибирский государственный технический университет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Московский физико-технический институт, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. и др.).

В диссертации решены: актуальная научная задача в области *радиофизики*, заключающаяся в изучении колебательных и волновых процессов взаимодействия интенсивного электронного потока с электромагнитными полями резонансных электродинамических

систем и фотонных кристаллов; актуальная научная задача в области *физической электроники*, заключающаяся в изучении физических процессов и закономерностей в электронных приборах на базе релятивистского электронного потока с виртуальным катодом.

Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9–11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На заседании 18 декабря 2020 года диссертационный совет принял решение присудить Бадарину Артему Александровичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 23 человек (18 человек находились в месте проведения заседания, 5 человек участвовали в заседании совета в удаленном интерактивном режиме), из них 6 докторов по специальности 01.04.03 – «Радиофизика», 7 докторов по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника», участвовавших в заседании, из 28 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 23, против – НЕТ, воздержавшихся – НЕТ.

Председатель

диссертационного совета

Ученый секретарь

диссертационного совета



Аникин Валерий Михайлович

Слепченков Михаил Михайлович

18 декабря 2020 г.