



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «АЛМАЗ»

410033 г. Саратов, ул. Панфилова 1

тел.: (8452) 632-557, 479-840, факс: (8452) 480-039, 633-558
email: info@almaz-rpe.ru, www.almaz-rpe.ru

УТВЕРЖДАЮ
Председатель
научно-технического
совета АО «НПП «Алмаз»
Генеральный директор
АО «НПП «Алмаз», к.э.н.



М. П. Апин
2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз» – на диссертационную работу Титова Алексея Владимировича «Волновые и колебательные явления в системах с двумя взаимодействующими электронными потоками», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Волновые и колебательные явления в системах взаимодействующих электронных потоков – одно из фундаментальных направлений исследований в радиофизике, лежащее на пересечении таких областей науки, как теория колебаний и волн, вакуумная сверхвысокочастотная электроника, физика плазмы и пр. В последние годы международное научное сообщество вновь начало проявлять интерес к системам с двумя взаимодействующими электронными пучками. Новый всплеск в исследованиях связан с существующей тенденцией к освоению терагерцового диапазона частот и с миниатюризацией радиофизических устройств. В связи с этим, тема диссертационной работы Титова А.В., посвященная созданию аналитической теории волновых и колебательных процессов (как линейной, так и нелинейной) в предварительно модулированных взаимодействующих электронных потоках, движущихся в попутном направлении, является актуальной и важной для современной радиофизики.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Первая глава диссертационной работы представляет собой обзор, посвященный явлению двухпучковой неустойчивости в электронике сверхвысоких частот. Рассмотренные в данном обзоре работы, с одной стороны, в полной мере иллюстрируют заинтересованность зарубежных исследователей в данной теме, а с другой стороны, подтверждают актуальность выбранной темы исследования. Вторая глава диссертационной работы посвящена качественной трактовке физики двухлучевой неустойчивости и

выявлению возможных режимов взаимодействия двух потоков в рамках теории связанных волн. В частности, проведен последовательный анализ процессов, протекающих при взаимодействии двух разноскоростных попутных электронных потоков. Подобный анализ с использованием метода связанных волн проведен впервые. Проведенная классификация волновых взаимодействий в системе двух попутных взаимодействующих потоков позволяла автору выделить конкретные типы индуцированного излучения, соответствующие моделям двух-, трёх- и четырехволнового взаимодействия. В третьей главе диссертационной работы в линейном приближении описан ряд моделей систем, включающих в себя два попутных взаимодействующих электронных потока с двумя взаимодействующими электронными потоками. В частности, предложен новый режим взаимодействия двух попутных электронных потоков, обеспечивающий вне границ области двухпотоковой неустойчивости усиление входного сигнала за счет интерференции парциальных волн постоянной амплитуды. Описанный режим представляет интерес для работы в коротковолновой области СВЧ диапазона. В рамках метода дисперсионного уравнения в линейном приближении проанализированы возможные режимы взаимодействия в модели двух попутных электронных потоков с бегущей электромагнитной волной. Показано, что помимо режима неустойчивости и крестатронного режима также имеет место интерференционно-крестатронный режим усиления. Согласно автору, сравнение выходных характеристик показывает, что добавление второго пучка приводит к увеличению области неустойчивости, а также к повышению коэффициента усиления вне области неустойчивости за счет интерференционного взаимодействия. Четвертая глава диссертационной работы посвящена нелинейной теории взаимодействия двух электронных потоков и их взаимодействия с электромагнитными полями. В ней на основе волнового метода построена приближенная нелинейная теория взаимодействия двух попутных электронных потоков и впоследствии развита приближенная нелинейная теория двухпотоковой ЛБВ. Также в рамках приближенной нелинейной теории двухпотоковой ЛБВ проведен анализ режимов работы, предложенных ранее. Показано, что добавление второго потока в определенных режимах позволяет получить прибавку к коэффициенту усиления. Проведено сравнение результатов линейной и нелинейной теорий двухпотоковых ЛБВ. Показано, что учет нелинейных эффектов в модели приводит к снижению коэффициента усиления по сравнению с линейной теорией.

Оценивая диссертационную работу в целом, стоит отметить, что А.В. Титовым были получены новые теоретические результаты, связанные с вопросами применения двух электронных потоков в приборах СВЧ, а также с вопросами теории двухпотоковой неустойчивости, представляющими большой

интерес для развития вакуумной СВЧ электроники. К достоинствам работы также следует отнести её целостность и разнообразие рассматриваемых моделей.

Основные результаты диссертации отражены в опубликованных работах автора.

Наиболее значимыми **новыми научными результатами**, полученными автором диссертации, являются:

- Впервые в терминах взаимодействия волн пространственного заряда построена последовательная линейная теория процессов, протекающих при взаимодействии двух разноскоростных попутных электронных потоков. Проведенный анализ двух-, трех- и четырехволнового взаимодействия волн пространственного заряда показывает, что в основе механизма излучения в двухпотоковой системе лежат эффект Вавилова-Черенкова и аномальный эффект Допплера.
- Впервые аналитически в трехволновом приближении на основе метода дисперсионных характеристик и метода связанных волн показана прямая аналогия между процессом взаимодействия двух попутных электронных потоков и процессом взаимодействия электронного потока с бегущей электромагнитной волной.
- Обоснован и предложен новый режим усиления электронно-волновой лампы, названный интерференционным. В данном режиме работы усиление достигается не за счет явления двухпотоковой неустойчивости, а благодаря интерференции четырех парциальных волн постоянной амплитуды.
- Обоснован и предложен новый интерференционно-крестатронный режим усиления лампы бегущей волны с двумя электронными потоками, в котором усиление достигается за счет интерференции пяти парциальных волн постоянной амплитуды.
- На основе нелинейной теории группировки электронного потока конечного радиуса в собственном поле пространственного заряда и волнового метода построена приближенная полуаналитическая теория взаимодействия двух попутных разноскоростных электронных потоков. Также на её основе построена приближенная нелинейная теория взаимодействия двух попутных электронных потоков с бегущей электромагнитной волной. В рамках этой теории проанализированы новые режимы усиления в системе «два электронных потока – электромагнитная волна», проведены расчеты выходных характеристик.

Достоверность полученных результатов определяется следующим:

- Используются традиционные для радиофизики и электроники СВЧ методы исследования процессов взаимодействия электронных потоков и

электромагнитной волны: метод дисперсионного уравнения, метод связанных волн и волновой метод.

- Результаты теории взаимодействия двух потоков в терминах взаимодействия связанных волн пространственного заряда согласуются с уже известными результатами линейной теории двухпоточковой неустойчивости в областях применимости обеих теорий.
- Результаты построенной полуаналитической нелинейной теории взаимодействия двух электронных потоков согласуются с уже известными результатами более ранних работ исследователей в этой области.

Диссертация удовлетворяет паспорту специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

В диссертационной работе имеются некоторые недостатки:

- В Главе 2 не рассмотрен случай встречных электронных потоков, что могло бы значительно расширить область представленных результатов.
- Рассмотренные в работе модели являются исключительно одномерными.
- В Главах 3 и 4 при описании результатов линейной и нелинейной теорий ЛБВ с двумя потоками следовало бы привести оценки реальных параметров электронных пучков.

Необходимо отметить, что указанные недостатки не снижают общий уровень диссертационной работы.

Результаты работы носят научно-прикладной характер. В частности, построенная аналитическая теория систем с двумя взаимодействующими электронными потоками, её математический аппарат и её результаты могут быть рекомендованы к использованию в конструкторской деятельности на начальном этапе моделирования для расчета выходных параметров приборов О-типа с двумя потоками. Предлагаемая модель электронно-волнового усилителя представляет интерес в коротковолновой части СВЧ диапазона. Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию в лекционных курсах, читаемых студентам-радиофизикам.

Таким образом, диссертационная работа Титова А.В. представляет собой законченное научное исследование в области радиофизики, выполненное самостоятельно, на высоком уровне.

Автореферат диссертации и научные публикации в полной мере отражают её суть и содержание. Диссертационная работа является самостоятельным научным исследованием.

Заключение. Диссертационная работа «Волновые и колебательные явления в системах с двумя взаимодействующими электронными потоками» удовлетворяет требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении

ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Титов Алексей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 «Радиофизика».

Отзыв составлен заместителем директора по научной работе НПЦ «Электронные системы» АО «НПП «Алмаз», к.т.н. Александром Давидовичем Рафаловичем. Специальность 05.27.02 – «Вакуумная и плазменная электроника, технические науки».

Адрес: 410033, Саратовская область, г. Саратов, ул. им. Панфилова И.В., д.1.

Отзыв утвержден на заседании научно-технического совета АО «НПП «Алмаз» (Протокол №1 от 3 марта 2021г.).

Заместитель директора по научной
работе НПЦ «Электронные системы»
АО «НПП «Алмаз», к.т.н.



А.Д. Рафалович

Ученый секретарь НТС,
заместитель директора
по развитию и внедрению
результатов НИОКР
НПЦ «Электронные системы», к.ф.-м.н.



В.И. Роговин

Подписи А.Д. Рафаловича и В.И. Роговина заверяю

Начальник отдела
управления персоналом



Н.А. Коноплина

410033, Саратовская область, г. Саратов, ул. им. Панфилова И.В., д.1
Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз»
Телефон/факс: +7 (8452) 63-35-58 / +7 (8452) 48-00-39
Адрес электронной почты: info@almaz-rpe.ru
Официальный сайт: <https://almaz-rpe.ru/>