

На правах рукописи



Титов Алексей Владимирович

ВОЛНОВЫЕ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ С ДВУМЯ
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПОТОКАМИ

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
член-корреспондент РАН,

Трубецков Дмитрий Иванович

Официальные оппоненты:

Куркин Семен Андреевич, доктор физико-математических наук, доцент, Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис», г. Иннополис, профессор лаборатории нейронауки и когнитивных технологий центра технологий компонентов робототехники и мехатроники

Галдецкий Анатолий Васильевич, кандидат физико-математических наук, Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Исток»» им. А. И. Шокина, г. Фрязино, Московская область, начальник отделения 10

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие Алмаз» (ОАО «НПП«Алмаз»), г. Саратов

Защита состоится «25» марта 2021 г. в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 при ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, X корпус, 510 аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич Саратовского национального исследовательского государственного университета (Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/d-212-243-01/kandidatskaya-dissertaciya-titova-aleksey>.

Автореферат разослан "...." 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат физ.-мат. наук, доцент



М.М. Слепченков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследуемой проблемы

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. Возникнув в первой половине прошлого века, это направление получило серьезный толчок благодаря исследователям, занимающимся разработкой и усовершенствованием СВЧ-приборов О-типа. Благодаря работам Дж. Пирса, А. Гаева, Л. Ниргаарда и многих других это направление получило большую популярность среди исследователей по всему миру, в том числе и в Советском Союзе. Достаточно обратиться к более ранним обзорам В. М. Лопухина¹ и Р. Бриггса². Интерес к исследованиям был обусловлен, прежде всего, теоретической возможностью замены замедляющей системы приборов О-типа вторым электронным пучком. В то же время предполагалось, что введение дополнительного скоростного разброса в электронный пучок повысит степень итоговой группировки электронов, что, свою очередь, должно повысить эффективность прибора в целом. Таким образом, появилось два направления исследований. Первое подразумевало создание приборов, принцип работы которых основывается на взаимодействии двух электронных пучков как таковом, таких как электронно-волновая лампа и двухлучевой усилитель. Второе направление отвечало за создание двухлучевых модификаций уже существующих приборов. К ним относились двухлучевые лампы бегущей волны, двухлучевые релятивистские пролетные клистроны, двухлучевые мазеры, а также двухлучевые лазеры на свободных электронах. Необходимо отметить значительный интерес к двухпоточковым системам со стороны специалистов из области плазменной электроники. К концу XX века интерес к двухпоточковым системам в низкочастотной области СВЧ диапазона значительно снизился. Тем не менее, активно продолжали вестись исследования высокомошных релятивистских двухпоточковых систем.

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

¹Лопухин В. М. Новый вид усилителя микрорадиоволн // УФН. 1950. Т. XL, вып. 4. С. 592 – 614.

²Бриггс Р. Двухпучковая неустойчивость. Достижения физики плазмы. М. : Мир, 1974. Т. 3, 4.

к освоению терагерцового диапазона частот и с миниатюризацией радиофизических устройств.

Как известно, сегодня большое внимание уделяется разработке и исследованию радиофизических систем, способных работать на стыке двух диапазонов – СВЧ и оптического. В частности, в 2014 году директор Агентства по перспективным исследованиям Министерства обороны США (DARPA) в своем ежегодном докладе отметил, что освоение терагерцового диапазона является одной из приоритетных задач. Вслед за уже завершенной программой DARPA «СВЧ-интегральная вакуумная электроника» (High Frequency Integrated Vacuum Electronics, HiFIVE), была анонсирована программа «Терагерцовая электроника» (THz electronics). В её рамках ставилась задача по созданию трех образцов вакуумных усилителей бегущей волны для трёх диапазонов частот^{3,4}: 670 ГГц, 850 ГГц и 1 ТГц. Все прототипы были успешно разработаны последовательно друг за другом⁵. Указанные работы ярко иллюстрируют чрезвычайно высокую сложность процесса освоения терагерцового диапазона. В связи с этим в сообществе исследователей возникла идея использования дополнительных механизмов для достижения поставленной задачи.

В настоящий же момент благодаря развитию современных технологий производства и тенденциям к переходу в коротковолновую область СВЧ диапазона ранее забытые двухпоточковые системы получили вторую жизнь. В частности, одной из первых научных групп, предложившей использовать системы с двумя электронными потоками, стала научная группа исследователей из Лос-Аламоса⁶. В указанной работе ими предложен проект СВЧ-генератора, принцип действия которого основан на взаимодействии двух попутных разносторонних релятивистских электронных пучков с полем открытого резонатора. Согласно прогнозу авторов, данное устройство должно генерировать мощность до 100 Вт на частоте 1 ТГц. Примерно в то же время были опубликованы посвященные двухпоточковой неустойчивости работы научных групп

³Tucek J. C. et al. A 100 mW, 0.670 THz power module // IVEC 2012, Monterey, CA, 2012, pp. 31-32.

⁴Tucek J. C. et al. Testing of a 0.850 THz vacuum electronic power amplifier// 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Paris, 2013, pp. 1-2.

⁵Tucek J. C. et al. Operation of a compact 1.03 THz power amplifier // 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Monterey, CA, 2016, pp. 1-2.

⁶Birhofberger K., Carlsten B.E., Faehl R. Generation of millimeter and sub- millimeter radiation in a compact oscillator utilizing the two-stream instability // IVEC 2008, april 22-24, 2008, p. 164.

из Китая^{7,8}, Японии⁹, Ирана^{10,11} и др. Основной лейтмотив проводимых исследований заключается в использовании механизма двухпоточковой неустойчивости в качестве вспомогательного для повышения выходных характеристик существующих приборов, например ЛОВ¹².

Большая часть упомянутых работ посвящена исключительно численному моделированию двухпоточковых систем и практически не содержит аналитических результатов. В первую очередь это связано с возросшей за последнее время вычислительной мощностью. Стоит также отметить, что помимо этого в настоящий момент наблюдается нехватка простой аналитической теории взаимодействия электронных потоков, позволяющей учесть нелинейные эффекты. Практически, единственным примером работ, посвященных аналитическому подходу к анализу нелинейных процессов в системе двух взаимодействующих электронных потоков, являются статьи Г.Ф. Филимонова^{13,14}. В них автор для описания полей пространственного заряда использует аппарат функции Грина. В настоящей диссертации предложен более удобный в применении метод анализа нелинейных процессов в системе двух взаимодействующих электронных потоков, основанный на теории процессов группировки электронных потоков в собственном поле пространственного заряда и волновом методе В.А. Солнцева¹⁵. Также не стоит забывать об отсутствии ясной физической трактовки явления двухпоточковой неустойчивости, выходящего далеко за рамки СВЧ электроники. Таким образом, исследования, результаты которых приведены в настоящей диссертации, нацелены, в том числе, на восполнение указанных пробелов.

⁷ Liu W., Liang Zh., Yang Z., Li D., Imasaki K. Two-stream smith-purcell free-electron laser using a dual-grating: linear analysis // Proceedings of FEL 2006, Bessy, Germany.

⁸ Liu W., Yang Z., Liang Zh., Li D., Imasaki K., Shi Z., Lan F., Park G., Liu Sh. Enhancements of Terahertz Radiation From a Grating Waveguide by Two-Stream Instability // IEEE Transactions on Plasma Science. 2008. Vol. 36, Issue 3, 748 - 756.

⁹ Umeda T., Omura Y., Miyake T., Matsumoto H. Nonlinear evolution of electron two-stream instability: Two-dimensional particle simulation // Proceedings of ISSS-7, March, 2005. 26-31.

¹⁰ Mohammadi S., Jazayeri M. Parallel PIC simulation for two stream instability // Iranian Journal of Physics Research. 2010. Vol. 10, № 3.

¹¹ Ghorbanalilu M., Abdollahzadeh E., Rahbari E. Particle-in-cell simulation of two stream instability in the non-extensive statistics // Laser and Particle Beams, 2014, vol. 32, 399–407.

¹² Liu W., Liu P., Yong W., Yang Z. Enhancements of Cherenkov Radiation by Two Electron Beams // IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 40, no. 3, pp. 835-842, March 2012.

¹³ Филимонов Г.Ф. Нелинейная теория двухлучевой электронной лампы. Ч1. Вывод и исследование уравнений // Радиотехника и Электроника, 1959, №3, стр. 489.

¹⁴ Филимонов Г.Ф. Нелинейная теория двухлучевой электронной лампы. Ч2. Результаты вычислений // Радиотехника и Электроника, 1959, №5, стр. 832.

¹⁵ В.А. Солнцев. Нелинейные волны в электронных потоках // Известия вузов. Радиофизика. 1974, Т. 17, №4. С. 616–626.

Сказанное выше позволяет считать тему диссертации актуальной и соответствующей специальности радиофизика – 01.04.03.

Объектом исследования являются системы с двумя взаимодействующими попутными электронными потоками.

Предметом исследования являются волновые и колебательные процессы, протекающие в системах с двумя взаимодействующими электронными потоками, а также возможные режимы взаимодействия двух потоков.

Цель диссертационной работы

Цель диссертации состоит в создании аналитической теории волновых и колебательных процессов (как линейной, так и нелинейной) в предварительно модулированных взаимодействующих электронных потоках, движущихся в попутном направлении.

Достижение поставленной цели обеспечено выполнением следующих **задач**:

1. Построение последовательной линейной теории взаимодействия двух предварительно модулированных попутных электронных потоков в рамках метода связанных волн с целью получения корректной физической трактовки явления двухпоточковой неустойчивости.
2. Анализ возможных режимов взаимодействия электронных потоков между собой и с полем бегущей электромагнитной волны внутри и вне областей неустойчивости.
3. Построение приближенной нелинейной теории двухпоточковой неустойчивости в рамках волнового метода Солнцева.
4. Построение на основе приближенной нелинейной теории двухпоточковой неустойчивости приближенной нелинейной теории взаимодействия двух электронных потоков с бегущей электромагнитной волной.

Положения и основные результаты, выносимые на защиту

1) В рамках развитой на основе метода связанных волн (в терминах взаимодействия волн пространственного заряда) последовательной теории двухпоточковой неустойчивости модель двух попутных взаимодействующих электронных потоков демонстрирует все виды индуцированного излучения, имеющие место в приборах типа О: излучение за счет аномального эффекта Доплера (модель двухволнового взаимодействия), Черенковское излучение и интерференционное усиление (модель трехволнового и четырехволнового взаимодействия).

2) В приближении линейной одномерной модели в системе двух взаимодействующих попутных, предварительно модулированных, разноскоростных, ионно-скомпенсированных электронных потоков при значениях

параметров системы, соответствующих отсутствию двухпоточковой неустойчивости (при значении параметра неоднородности $\chi > \sqrt{2}$), имеет место режим усиления, увеличение мощности входного сигнала в котором достигается за счет интерференции четырех парциальных волн постоянной амплитуды.

3) В приближении линейной одномерной модели в системе «два взаимодействующих электронных потока – бегущая электромагнитная волна» при значениях параметров, соответствующих случаю отсутствия в решении нарастающих парциальных волн, существует режим усиления, в котором увеличение мощности выходного сигнала осуществляется вне области неустойчивости за счет интерференции пяти парциальных волн постоянной амплитуды.

4) В нелинейной модели добавление к системе «электронный поток – бегущая электромагнитная волна» второго электронного потока позволяет увеличить ширину частотной области конвективной неустойчивости, а также повысить коэффициент усиления вне области неустойчивости по сравнению с однолучевой моделью за счет интерференционно-крестатронного взаимодействия.

Научная новизна

1) 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 двухпоточковой системе лежат эффект Вавилова-Черенкова и аномальный эффект Доплера.

2) 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.

3) Обоснован и предложен новый режим усиления электронно-волновой лампы, названный интерференционным. В данном режиме работы усиление достигается не за счет явления двухпоточковой неустойчивости, а благодаря интерференции четырех парциальных волн постоянной амплитуды.

4) 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.

5) На основе нелинейной теории группировки электронного потока конечного радиуса в собственном поле пространственного заряда и волнового метода построена приближенная полуаналитическая теория взаимодействия двух попутных разноразностных 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.

Методология и методы исследования

При анализе колебательных и волновых процессов взаимодействия в исследуемых системах «два предварительно модулированных взаимодействующих попутных электронных потока» и «два электронных потока – электромагнитная волна» применяются традиционные для вакуумной СВЧ электроники метод связанных волн и метод дисперсионного уравнения. В линейной теории в качестве основной теоретической модели используется гидродинамическая модель одномерного бесконечно широкого ионно-скомпенсированного электронного потока.

При анализе нелинейных колебательных и волновых процессов во взаимодействующих электронных потоках применяется классический для СВЧ электроники волновой метод Солнцева наряду с дисковой моделью электронного пучка.

Научно-практическая значимость

Построенная аналитическая теория систем с двумя взаимодействующими электронными потоками, её математический аппарат и её результаты рекомендуются 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 рекомендуются к использованию в лекционных курсах, читаемых студентам-радиофизикам, в частности в курсах «Физика микроволн», «Электроника СВЧ и телекоммуникационные технологии», «Нелинейная динамика активных сред» и «Динамическое моделирование и диагностика».

Достоверность полученных результатов определяется следующим:

1. 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.

2. 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.

3. Результаты построенной полуаналитической нелинейной теории взаимодействия двух электронных потоков согласуются с уже известными результатами более ранних работ исследователей в этой области.

Апробация работы и публикации

Результаты, представленные в диссертации, докладывались на следующих школах, семинарах и конференциях:

- Научная школа-конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2010» (Саратов, 2010),
- Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» (Звенигород, 2011; Можайск, 2013, 2017, 2019),
- VI научная конференция молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2011),
- 5-я Всероссийская молодежная конференция «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» (Москва, 2011),
- Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» (Звенигород, 2012; Можайск, 2014, 2016),
- «Всероссийская научная конференция «Проблемы СВЧ электроники» (Москва, 2013),
- 11-я Международная школа «Хаотические колебания и образование структур» (Саратов, 2016),
- Научно-техническая конференция «Электронные приборы и устройства СВЧ» (Б/О «Луч», АО «НПП «Алмаз», 2017),
- XVII Международная Зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, 2018),
- на объединенных научных семинарах кафедр факультета нелинейных процессов СГУ (Саратов, июнь 2017, апрель 2018, сентябрь 2020).

Материалы диссертации использовались при выполнении научно-исследовательских работ по грантам Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты № 13-02-01209-а, № 16-02-00238-а, 16-32-00468-мол_а, 18-02-00666-а).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 15 работ, из них 5 статей в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук и индексируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования Web of Science и/или Scopus, 1 статья в материалах V Всероссийского

конкурса молодых ученых, 9 статей в сборниках трудов научных конференций и семинаров.

Личный вклад соискателя

Включённые в диссертационную работу аналитические модели и полученные на их основе результаты получены лично соискателем. Постановка задач, обсуждение методов их решения и интерпретация полученных результатов проведены совместно с научным руководителем.

Структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 142 страницы, из которых 129 страниц основного текста, включая 2 таблицы и 86 иллюстраций. Список литературы состоит из 107 наименований на 10 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны её цели, научная новизна, практическая значимость и сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертационной работы представляет собой обзор, посвященный явлению двухпучковой неустойчивости в электронике сверхвысоких частот. Целью обзора является освещение по возможности наиболее полного списка существующих на сегодняшний день трудов, посвященных различным моделям и методам анализа двухпучковой неустойчивости. В подразделах обзора 1.1-1.5 собраны работы, внесшие основной вклад в развитие идей двухпоточковой неустойчивости в электронике. В разделе 1.6 проведен анализ последних наиболее актуальных работ, посвященных явлению двухпоточковой неустойчивости в электронике СВЧ, а также системам и приборам, в которых применяются два взаимодействующих электронных потока. 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 параграфе 2.1 приведены основные уравнения теории взаимодействия двух электронных потоков с точки зрения линейной теории связанных волн.

Для системы двух бесконечно широких ионно-скомпенсированных идеально перемешанных электронных потоков в отсутствие теплового разброса, движущихся в одном направлении с незначительно различающимися

скоростями в продольном магнитном поле бесконечно большой величины в линейном приближении можно записать систему связанных уравнений для переменных компонент токов пучков в интегральной форме:

$$i_1(x) = -e^{-j(k_{e1}-k_{p1})x} \left[\frac{k_{p1}}{2j} \int_0^x i_2(\zeta) e^{j(k_{e1}-k_{p1})\zeta} d\zeta + \frac{i_1(0)}{2} + \frac{k_{e1}I_{01}}{k_{p1}v_{01}} v_1(0) \right] + e^{-j(k_{e1}+k_{p1})x} \left[\frac{k_{p1}}{2j} \int_0^x i_2(\zeta) e^{j(k_{e1}+k_{p1})\zeta} d\zeta + \frac{i_1(0)}{2} - \frac{k_{e1}I_{01}}{k_{p1}v_{01}} v_1(0) \right], (1)$$

$$i_2(x) = -e^{-j(k_{e2}-k_{p2})x} \left[\frac{k_{p2}}{2j} \int_0^x i_1(\zeta) e^{j(k_{e2}-k_{p2})\zeta} d\zeta + \frac{i_2(0)}{2} + \frac{k_{e2}I_{02}}{k_{p2}v_{02}} v_2(0) \right] + e^{-j(k_{e2}+k_{p2})x} \left[\frac{k_{p2}}{2j} \int_0^x i_1(\zeta) e^{j(k_{e2}+k_{p2})\zeta} d\zeta + \frac{i_2(0)}{2} - \frac{k_{e2}I_{02}}{k_{p2}v_{02}} v_2(0) \right], (2)$$

здесь i_1, i_2 – переменные составляющие токов пучков, $k_{e1,e2} = \omega/v_{01,02}$, $k_{p1,p2} = \omega_{p1,p2}/v_{01,02}$, ω – частота возмущающего сигнала, $\omega_{p1,p2}$ – плазменные частоты пучков, $v_{01,02}$ – невозмущенные скорости пучков $i_{1,2}(0)$ – начальные значения переменных компонент токов, $v_{1,2}(0)$ – начальные значения переменных компонент скоростей, $I_{01,02}$ – постоянные компоненты токов пучков.

Таким образом, правые части уравнений системы (1) – (2) представляют собой суммы «быстрой» и «медленной» волн. В следующих параграфах данной главы рассмотрены все комбинации взаимодействия волн пространственного заряда в двух пучках.

В параграфе 2.2 рассмотрены все возможные случаи двухволнового взаимодействия волн пространственного заряда в двух попутных потоках. Основанием для такого рассмотрения служит известный факт, что взаимодействие волн с различными по знаку потоками кинетической мощности может приводить к возникновению неустойчивости^{16,17}. Наибольший интерес с точки зрения неустойчивости представляет взаимодействие быстрой волны пространственного заряда (БВПЗ) одного пучка с медленной волной пространственного заряда (МВПЗ) другого. Известно, что БВПЗ переносит положительный поток кинетической мощности, в то время как МВПЗ – отрицательный. Для данной системы получена и аналитически решена система связанных

¹⁶Люиселл У. Связанные и параметрические колебания в электронике // М.: ИЛ, 1963. 352 с.

¹⁷Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 2001. 560 с.

дифференциальных уравнений для токов, соответствующих волнам пространственного заряда; получено и проанализировано дисперсионное соотношение и дисперсионная характеристика. Также были проанализированы случаи взаимодействия двух БВПЗ обоих пучков и случаи взаимодействия двух МВПЗ. Рассмотренные в типы двухволнового взаимодействия представляют собой элементарную основу для понимания сложных процессов энергообмена между взаимодействующими электронными потоками. Полученные результаты дают первоначальное представление о физике процессов взаимодействия двух электронных потоков. Последующий учет во взаимодействии оставшихся волн позволяет дать уточненное качественное описание явления двухпотоковой неустойчивости.

Следует отметить, что частный случай взаимодействия медленной волны пространственного заряда в быстром пучке с быстрой волной пространственного заряда в медленном пучке представляет значительный интерес с точки зрения пояснения механизма излучения, возникающего при двухпотоковом взаимодействии. Согласно М.В. Незлину¹⁸, существует прямая физическая аналогия между неустойчивостью волны с отрицательной энергией, взаимодействующей со средой с положительной энергией, и аномальным эффектом Допплера. Отличия заключаются только в том, что эффект Допплера применительно к частице является элементарным процессом, связанным с изменением энергии самой частицы, в то время как неустойчивость является коллективным процессом, связанным с изменением энергии ансамбля частиц в пучке. Как указывает М.В. Незлин, неустойчивость волны возникает как раз за счет одиночного акта излучения частицы, который впоследствии индуцирует последующие. В связи с этим неустойчивость волны с отрицательной энергией можно интерпретировать как индуцированный аномальный эффект Допплера. Однако, как отмечено также в книге Д.И. Трубецкого и А.Г. Рожнева¹⁹, применительно к СВЧ-приборам подобная аналогия справедлива только в двухволновом приближении. В трехволновом приближении, при участии во взаимодействии обеих волн пространственного заряда быстрого пучка будет иметь место индуцированное излучение Вавилова-Черенкова.

В параграфе 2.3 приведены результаты анализа двухпотокового взаимодействия в трехволновом приближении (рисунок 1). Случай взаимодействия двух потоков, когда в одном из них возбуждены обе волны пространственного заряда, а в другом возбуждена только быстрая волна, представляет

¹⁸Незлин М.В. Волны с отрицательной энергией и аномальный эффект Допплера // УФН, 1976. Т. 120, вып. 3. С.481–495.

¹⁹Трубецков Д.И., Рожнев А.Г. Линейные колебания и волны. Учеб. пособие. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001. – 416 с.

наибольший интерес, поскольку позволяет наиболее полно провести аналогию между процессами, протекающими в системах с двумя электронными потоками, и процессами, лежащими в основе работы лампы бегущей волны.

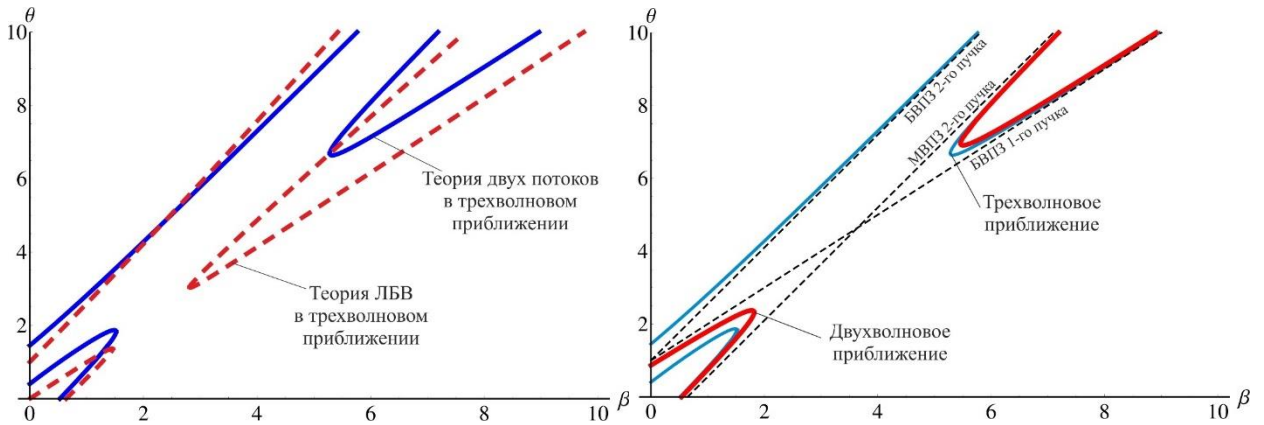


Рисунок 1 – Дисперсионная характеристика ЛБВ в трехволновом приближении и двухпотоковой системы в трехволновом приближении (слева); дисперсионные характеристики для двухпотоковой системы в двух- и трехволновом приближениях (справа).

Для данной системы получена и аналитически решена система связанных дифференциальных уравнений для токов, соответствующих волнам пространственного заряда; получено и проанализировано дисперсионное соотношение и дисперсионная характеристика. Из полученной дисперсионной характеристики следует, что неустойчивость может развиваться в случае, когда отдельная быстрая волна возбуждена в медленном электронном потоке, а в быстром потоке возбуждены обе волны пространственного заряда.

В работе показано, что структура полученного в трехволновом приближении дисперсионного уравнения для двух потоков полностью совпадает со структурой дисперсионного уравнения из теории ЛБВ в трехволновом приближении. Это же подтверждает прямое сравнение соответствующих дисперсионных характеристик. Таким образом, можно сделать вывод, что в трехволновом приближении имеет место аналогия между процессами, протекающими при взаимодействии двух волн пространственного заряда более быстрого электронного потока с быстрой волной пространственного заряда более медленного потока, и процессами, протекающими в ЛБВ. Также можно заключить, что в трехволновом приближении в двухпотоковой системе в указанном случае имеет место индуцированное излучение Вавилова-Черенкова.

В параграфе 2.4 завершено рассмотрение процессов в двухпотоковой системе анализом полной модели четырехволнового взаимодействия. На основе системы связанных дифференциальных уравнений получены дисперсионные характеристики и распределение амплитуд волн пространственного заряда вдоль длины пространства взаимодействия. В параграфе 2.5 сформулированы основные выводы к Главе 2.

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 параграфе 3.1 предложен новый режим взаимодействия усиления в системе двух взаимодействующих электронных потоков, названный интерференционным. Предполагается, что данный режим позволит двухпотоковым системам обойти ограничения на повышение рабочей частоты и продвинуться в коротковолновую область СВЧ диапазона. Данный режим рассматривается впервые, хотя возможность его существования предполагалась еще в работе В. Доу и Дж. Роу²⁰.

На основе линейной гидродинамической модели двух взаимодействующих попутных разноскоростных электронных потоков показано, что при превышении параметром неоднородности значения $\sqrt{2}$, в системе отсутствует неустойчивость (рисунок 2).

В этом случае при наличии начальной модуляции токов пучков решение системы (3) для переменных компонент токов пучков представляет собой суперпозицию четырех парциальных волн постоянной амплитуды, распространяющихся с различными фазовыми скоростями. На некоторой длине пространства взаимодействия эти парциальные волны за счет эффективной интерференции способны обеспечить увеличение значения сгруппированного тока по сравнению со входным значением.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_1}{dx^2} + 2jk_{e1} \frac{di_1}{dx} - (k_{e1}^2 - k_{p1}^2) i_1 &= -k_{p1}^2 i_2, \\ \frac{d^2 i_2}{dx^2} + 2jk_{e2} \frac{di_2}{dx} - (k_{e2}^2 - k_{p2}^2) i_2 &= -k_{p2}^2 i_1, \end{aligned} \quad (3)$$

здесь i_1, i_2 – переменные составляющие токов пучков, $k_{e1,e2} = \omega/v_{01,02}$, $k_{p1,p2} = \omega_{p1,p2}/v_{01,02}$, ω – частота возмущающего сигнала, $\omega_{p1,p2}$ – плазменные частоты пучков, $v_{01,02}$ – невозмущенные скорости пучков.

За счет указанного эффекта возможно увеличение мощности входного сигнала вне области двухпотоковой неустойчивости. Данный режим усиления представляет интерес для коротковолновой области СВЧ диапазона, поскольку снимает ограничение на повышение частоты для двухпотоковых систем, связанное с условием существования двухпотоковой неустойчивости.

²⁰ Dow W.G., Rowe J.E. General aspects of beating-wave amplification // Proc. IRE. 1960. Vol. 48, No 1. P. 115.

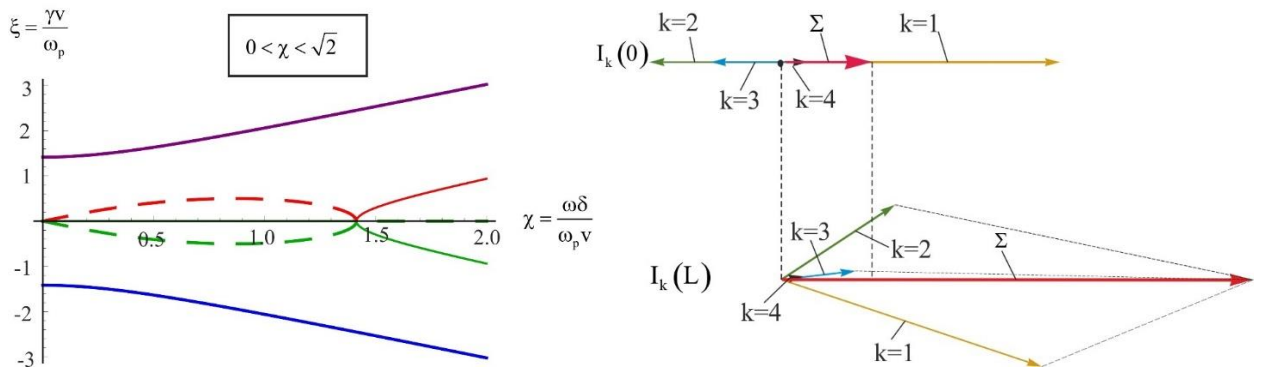


Рисунок 2 – Дисперсионная характеристика двухпоточковой системы (слева); векторная диаграмма, демонстрирующая сложение парциальных волн, приводящее к увеличению выходного сигнала (справа).

В параграфе 3.2 в рамках метода дисперсионного уравнения описана линейная теория взаимодействия двух электронных потоков с бегущей электромагнитной волной. В одномерном приближении рассмотрена система двух взаимодействующих, идеально перемешанных, бесконечно широких, движущихся в одинаковом направлении электронных потоков, взаимодействующих с продольной компонентой электрического поля бегущей волны в замедляющей структуре. Соответствующая система дифференциальных уравнений в предположении, что все переменные величины изменяются по закону $e^{j\omega t}$, включает в себя уравнения для высокочастотных компонент сгруппированного тока в каждом потоке и одно уравнение возбуждения прямой бегущей волны поля в замедляющей структуре. На основе решения указанной системы и полученного дисперсионного уравнения (4) проведен анализ возможных режимов работы и расчет выходных характеристик модели.

$$\frac{\beta_{p1}^2}{(\beta - \beta_{e1})^2} + \frac{\beta_{p2}^2}{(\beta - \beta_{e2})^2} = 1 + \frac{\beta_0^2 \beta_{e1} C_{01}^3}{(\beta - \beta_0)(\beta - \beta_{e1})^2} + \frac{\beta_0^2 \beta_{e2} C_{02}^3}{(\beta - \beta_0)(\beta - \beta_{e2})^2} \quad (4)$$

Показано, что в данной системе возможно выделить три режима работы: режим двухпоточковой неустойчивости, отсутствие ЛБВ-неустойчивости; двухпоточковая неустойчивость и ЛБВ-неустойчивость; отсутствие неустойчивости, интерференционно-крестатронный режим (рисунок 3). На основе аналитического решения самосогласованной задачи в приближении пяти волн проведено сравнение выходных характеристик систем с одним электронным потоком и систем с двумя потоками.

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы. 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.

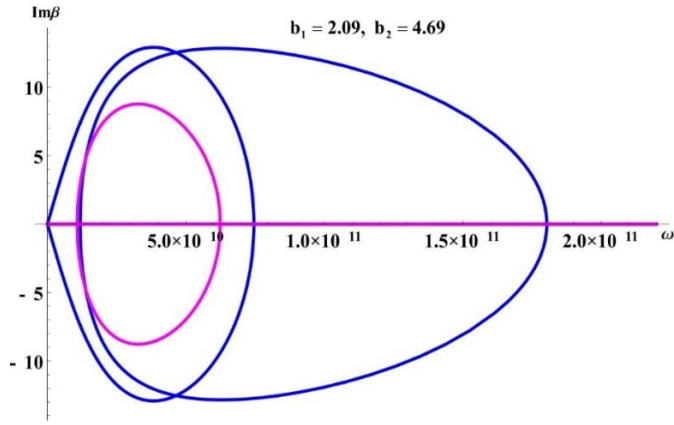


Рисунок 3 – Дисперсионные характеристики (мнимые части решения) для случаев взаимодействия двух электронных потоков с волной (синяя кривая) и одного потока с волной (фиолетовая кривая).

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.

В параграфе 3.3 сформулированы основные выводы к Главе 3.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена нелинейной теории взаимодействия двух электронных потоков и их взаимодействия с электромагнитными полями.

В параграфе 4.1 приведены основные уравнения приближенной нелинейной теории взаимодействия двух электронных потоков. На основе нелинейной теории группировки электронного потока в собственном поле пространственного заряда получена система связанных интегро-дифференциальных уравнений относительно функций возмущения фаз электронов в каждом пучке в переменных Лагранжа. Для описания полей пространственного заряда использована дисковая модель электронного пучка. С помощью волнового метода указанная система уравнений сведена к системе связанных нелинейных дифференциальных уравнений относительно параметров группировки пучков:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{B}_1}{\partial x^2} = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{p_{1n}^2 \beta_{p1}^2 e^{j\text{Arg}(B_1)}}{n} J_n(n|B_1|) [J_{n-1}(n|B_1|) - J_{n+1}(n|B_1|)] + \frac{p_{2n}^2 \beta_{p2}^2 S^3 e^{j\text{Arg}(B_2)}}{n} J_n(n|B_2|) [J_{n-1}(n|B_2|) - J_{n+1}(n|B_2|)] \right\}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{B}_2}{\partial x^2} = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{p_{1n}^2 \beta_{p1}^2 e^{j\text{Arg}(B_1)}}{n S^3} J_n(n|B_1|) [J_{n-1}(n|B_1|) - J_{n+1}(n|B_1|)] + \frac{p_{2n}^2 \beta_{p2}^2 e^{j\text{Arg}(B_2)}}{n} J_n(n|B_2|) [J_{n-1}(n|B_2|) - J_{n+1}(n|B_2|)] \right\}, \quad (6)$$

здесь $B_{1,2}$ – комплексные амплитуды первых пространственных гармоник функций возмущения фаз электронов первого и второго потоков, $p_{1n,2n}^2 = n^2 / (n^2 + k_{1,2}^2)$, $k_{1,2}$ – величины, обратно пропорциональные радиусам первого и второго потоков, n – номер возбуждаемой гармоники тока, $\beta_{p1,p2}$ – плазменные постоянные распространения, $S = v_{02}/v_{01}$ – отношение постоянных составляющих скоростей потоков, $J_n(X)$ – функция Бесселя – n -го порядка.

Система (5) – (6) дополняется выражениями для гармоник токов:

$$\begin{cases} I_{1n}(x) = I_{01} I'_{1n} e^{-jn\beta_{e1}x}, \\ I_{2n}(x) = I_{02} I'_{2n} e^{-jn\beta_{e2}x}, \end{cases} \quad \begin{cases} I'_{1n} = 2J_n(n|B_1|) e^{jn(\varphi_1 - \frac{\pi}{2})}, \\ I'_{2n} = 2J_n(n|B_2|) e^{jn(\varphi_2 - \frac{\pi}{2})}, \end{cases} \quad (7)$$

здесь I_{01}, I_{02} – постоянные компоненты токов пучков, $\beta_{e1,e2}$ – постоянные распространения потоков, $\varphi_1 = \text{Arg}(B_1)$, $\varphi_2 = \text{Arg}(B_2)$.

Полученный математический аппарат позволяет рассчитать величину сгруппированного тока каждого пучка в нелинейном приближении при наличии начальной модуляции. Математически проведена аналогия между системой двух взаимодействующих электронных пучков и системой двух связанных нелинейных осцилляторов.

В параграфе 4.2 проведена линеаризация полученных ранее уравнений с целью осуществления предельного перехода к линейной теории двухпотоковой неустойчивости.

В параграфе 4.3 приведены результаты приближенной нелинейной теории, в частности, построена приближенная нелинейная теория лампы бегущей волны с двумя электронными потоками. Для этого система уравнений для токов пучков дополнена уравнением возбуждения. На основе построенной теории проведены расчет выходных характеристик ЛБВ с двумя электронными потоками и сравнение с классическим однолучевым вариантом в режимах, описанных в предыдущей главе. Приведена серия диаграмм с графиками зависимости коэффициента усиления от длины системы. Показано, что добавление второго пучка приводит к расширению частотной области неустойчивости, а также к повышению коэффициента усиления в интерференционно-квестатронном режиме.

Также проведено сравнение результатов линейной и нелинейной теорий (рисунок 4). Показано, что учет нелинейности приводит к уменьшению коэффициента усиления за счет ограничения двухпотоковой неустойчивости.

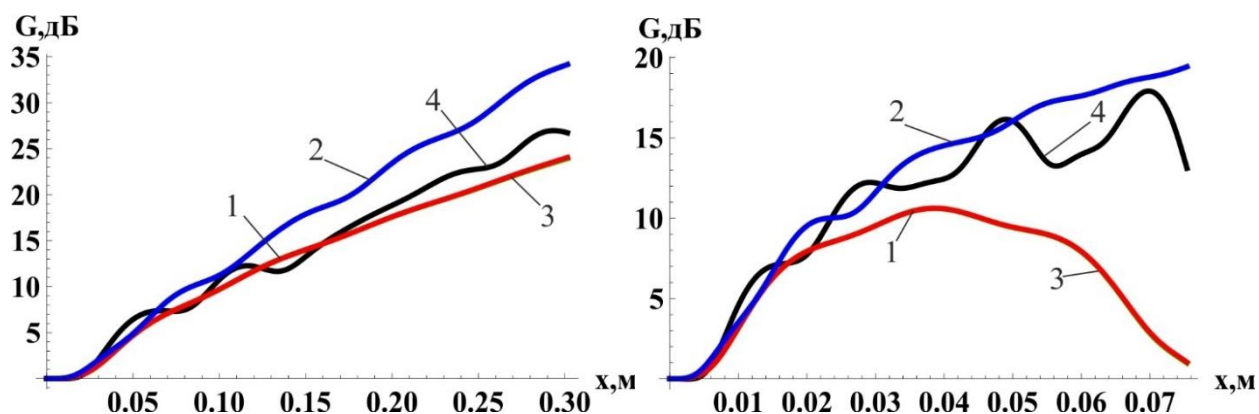


Рисунок 4 – Зависимости коэффициента усиления от длины системы для четырех моделей при $\omega = 5 \cdot 10^{10} \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ (слева) и $\omega = 10^{11} \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ (справа); 1 – линейная теория, один поток; 2 – линейная теория, два потока; 3 – нелинейная теория, один поток; 4 – нелинейная теория, два потока.

В параграфе 4.4 сформулированы выводы к Главе 4.

В **Заключении** сформулированы основные выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе проведен анализ последних наиболее актуальных работ, посвященных явлению двухпоточковой неустойчивости в электронике СВЧ, а также системам и приборам, в которых применяются два взаимодействующих электронных потока. Данный обзор позволил выделить основные тенденции современного развития двухпоточковых систем и обозначить первоначальный круг задач, решаемых в настоящей диссертационной работе.

На основе метода связанных волн 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 позволяет выделить следующие виды индуцированного излучения, соответствующего разным моделям:

- Излучение за счет аномального эффекта Доплера (модель двухволнового взаимодействия),
- Черенковское излучение и интерференционное усиление (модель трехволнового и четырехволнового взаимодействия).

Рассмотренная модель двух попутных взаимодействующих электронных потоков демонстрирует все виды индуцированного излучения, имеющие место в приборах типа О.

В диссертационной работе предложен новый режим взаимодействия двух попутных электронных потоков, названный интерференционным, 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.

Также в диссертационной работе проведен анализ возможных режимов взаимодействия линейной модели двух попутных электронных потоков с бегущей электромагнитной волной и впервые решена самосогласованная задача для линейной одномерной модели системы «два попутных электронных потока – бегущая волна» в приближении пяти волн. На основе метода дисперсионного уравнения и решения самосогласованной задачи показана возможность реализации в указанной системе вне областей неустойчивости интерференционно-крестатронного режима усиления. Также показано, что добавление второго пучка приводит к расширению частотной области неустойчивости, а также к повышению коэффициента усиления вне области неустойчивости за счет интерференционно-крестатронного режима усиления.

На основе волнового метода построена приближенная нелинейная теория взаимодействия двух попутных электронных потоков. На её основе развита приближенная нелинейная теория двухпотоковой ЛБВ.

На основе приближенной нелинейной теории двухпотоковой ЛБВ проведен анализ режимов работы, предложенных ранее. Показано, что добавление второго потока позволяет получить прибавку к коэффициенту усиления.

Проведено сравнение результатов линейной и нелинейной теорий двухпотоковых ЛБВ. Показано, что учет нелинейных эффектов в рассмотренной модели приводит к снижению коэффициента усиления по сравнению с линейной теорией на величину порядка 4-6дБ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Титов А.В.** Приближенная нелинейная теория двухпучковой неустойчивости // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, №3. С. 132–139.
2. Трубецков Д.И., **Титов А.В.**, Фунтов А.А. Об интерференционном усилении в электронно-волновой лампе (линейная теория) // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 21. С. 86–94.
3. Трубецков Д. И., **Титов А. В.** Теория электронно-волновых приборов для коротковолновой части сверхвысокочастотного диапазона // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 8. С. 736–744.
4. **Титов А.В.** Двухпотоковая неустойчивость – волновые линейные и нелинейные явления на сверхвысоких частотах. Часть I // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24, №1. С. 37–74.

5. **Титов А.В.** Двухпоточковая неустойчивость – волновые линейные и нелинейные явления на сверхвысоких частотах. Часть II // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24, №2. С. 41–63.
6. **Титов А.В.** Линейная и приближенная нелинейная теории двухпучковой неустойчивости (метод связанных волн и волновой метод Солнцева). Итоги диссертационных исследований. Том 1. – Материалы V Всероссийского конкурса молодых ученых. – М.: РАН, 2013. – 131с. С. 3–13.
7. **Титов А.В.,** Фунтов А.А. Об интерференционном усилении в модели двух взаимодействующих электронных потоков // Ученые Записки Физического Факультета МГУ. 2013, №5. С. 48–51.
8. **Титов А.В.** Некоторые вопросы линейной теории двухлучевой неустойчивости. Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2010: Сборник материалов научной школы-конференции. Саратов, 6 октября, 24, 26 ноября 2010. Саратов: ООО ИЦ «Наука», 2011. 124 с. С. 40–43.
9. **Титов А.В.** Некоторые вопросы линейной теории двухлучевой неустойчивости // Сборник трудов участников XIII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» («Волны-2011»). – Секция 1. Микроволновая электроника (генераторы и приемники). Москва, 2011. С. 64–66.
10. **Титов А.В.** Нелинейные волновые и колебательные процессы при взаимодействии двух электронных потоков. «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тезисы докладов VI Всероссийской конференции молодых ученых. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 2011. – 180 с. С. 164–165.
11. **Титов А.В.** Приближенная нелинейная теория двухпучковой неустойчивости // Сборник трудов участников XIII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2012»). – Секция 6. Микроволновая электроника и электродинамика. Москва, 2012. С. 26–29.
12. **Титов А.В.,** Фунтов А.А. Об интерференционном усилении в модели двух взаимодействующих однонаправленных электронных потоков // Сборник трудов участников XIII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2013»). – Секция 11. Микроэлектроника и электродинамика. Москва, 2013. С. 54–57.
13. Трубецков Д.И., **Титов А.В.,** Фунтов А.А. Теория электронно-волновых приборов для коротковолновой части СВЧ диапазона // «Всероссийская научная конференция «Проблемы СВЧ электроники». Труды конференции. 24-25 октября 2013 года, Москва. МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 113–117.
14. Трубецков Д.И., **Титов А.В.,** Вдовина Г.М. Забытые приборы возвращаются. Часть 2. Двухлучевые лампы. Электронные приборы и устройства СВЧ: Материалы науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию АО «НПП«Алмаз»- Саратов, 2017. – 196с. С. 11–14.
15. **Титов А.В.,** Трубецков Д.И., Фунтов А.А. Волновой метод Овчарова-Солнцева в теории нетрадиционных СВЧ приборов. III Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы СВЧ электроники» им. В.А. Солнцева 2017. М.: ИД Медиа Паблишер, 2017. С. 5–6.