

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Шешина Е.П.

на диссертацию Егорова Романа Владимировича

«Повышение эффективности клистронов большой мощности – теория и эксперимент», представленной на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

Актуальность темы исследования обусловлена широким применением клистронных усилителей для задач прикладной и фундаментальной физики. Клистроны являются основными источниками большой микроволновой мощности современных суперколлайдеров, ускорителей медицинского назначения, досмотровых комплексов, выходных каскадов передатчиков и других приложений, в которых используется мощное СВЧ излучение, в том числе оборонная промышленность. Традиционно главными задачами СВЧ электроники являются повышение эффективности преобразования энергии электронного потока в энергию электромагнитных колебаний и волн, повышение КПД СВЧ устройств, а также повышение выходной мощности СВЧ приборов непрерывного и импульсного действия. В настоящее время в микроволновой электронике вопросы повышения эффективности и выходной мощности решаются применением многолучевой технологии на основе пучков круглого или кольцевого сечения, а также применением ленточного пучка. Такие подходы дают возможность осуществить одновременно большой общий ток и низкую плотность пространственного заряда, что ведет к качественному группированию отдельных низкочастотных пучков. В последние годы активное развитие получили многолучевые технологии. В таких приборах удастся совместить основные преимущества клистронных усилителей: большая выходная мощность, высокая эффективность, высокий коэффициент усиления, низкое питающее напряжение по сравнению с однолучевыми аналогами. Очевидными преимуществами низких питающих напряжений являются меньшие вес и объем клистрона, меньшие габариты источников питания, меньший уровень рентгеновского излучения со стороны коллектора, увеличенная надежность. Диссертационная работа соискателя Егорова Романа Владимировича посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию принципиально нового механизма группирования электронов в клистронных усилителях, а также поиску физических ограничений эффективности клистронных усилителей.

Содержание диссертационного исследования

Работа состоит из введения, шести глав, заключения. Во введении раскрывается актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, показана научная новизна и практическая значимость.

Первая глава диссертации носит обзорный характер. В ней представлены краткая история развития клистронных технологий, применение клистронных усилителей, отличительные особенности однолучевого клистрона от многолучевого с преимуществами многолучевой технологии, проблемы, с которыми сталкиваются разработчики, и решаемые при этом задачи, а также текущее состояние и перспективы клистронных технологий.

Во **второй главе** рассмотрены различные современные методы группирования электронов в клистронных усилителях. К ним относятся COM – метод группировки, CSM – метод группировки, 3D – метод группировки, а также рассмотрена традиционная группировка электронов.

Третья глава посвящена теоретическому исследованию БАК – метода группирования электронов в пролётных клистронах. В этой главе приведены описание БАК – метода, проведенные автором расчёты в различных одномерных и двумерных программах, предложен клистрон с двумя БАК – колебаниями для ускорительной техники с эффективностью выше 80%, показана теоретическая оптимизация первых экспериментальных БАК – клистронов. Приведено сравнение БАК – метода с COM – методом группировки электронов.

В **четвертой главе** рассмотрены электродинамические и электронно-оптические задачи, которые необходимо было решать автору при построении первого БАК – клистрона. Определен модовый состав и структуры мод резонаторов электродинамической системы клистрона в трёхмерных программах, исследованы распределения характеристического сопротивления в каналах резонаторов, оптимизирована «электронно-оптическая» система пролётного клистрона, определен профиль магнитного поля в рабочих промежутках, рассмотрено оседание электронов на коллекторе.

В **пятой главе** представлен обзор динамических испытаний первых многолучевых БАК – клистронов большой мощности, проведенные в ОИЯИ (г. Дубна) и в ЦЕРН'е (Женева). Проведено сравнение результатов испытаний с прототипом и существующими зарубежными аналогами. Рассмотрена возможность повышения выходной мощности разработанных БАК – клистронов.

В **шестой главе** автором исследованы трёхмерные физические процессы в многолучевом клистроне, выявлены физические факторы, которые приводят к значительным затруднениям при стремлении повысить КПД разработанных многолучевых клистронов до значений 70-80%.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты и их новизна:

1. Проверена в расчётах и впервые в мире подтверждена в экспериментах возможность повышения эффективности многолучевого клистрона за счет применения нового метода группирования электронов БАК – метода. Динамические испытания первых спроектированных БАК-клистронов, проведенные в ОИЯИ (Дубна) и в ЦЕРН (Женева), показали впервые усиление СВЧ с выходной мощностью 7 МВт и эффективностью 64%. Результаты практических испытаний доказывают, что КПД новых клистронов, в которых представлены БАК – резонаторы, может быть выше на 20% по сравнению с прототипами и однолучевыми аналогами, в которых используется традиционная группировка электронного потока.

2. Расчётная эффективность модифицированных БАК – клистронов с выходной мощностью от 10 до 40 МВт находится на уровне $67 \div 70\%$. Клистрон с уровнем выходной мощности 10 МВт может быть спроектирован без изменения конструкции разработанных БАК – клистронов с выходной мощностью 6 МВт. Конструкция клистронов с уровнем выходной мощности 30-40 МВт будет существенно отличаться, поскольку питающее напряжение будет составлять величину порядка 100 кВ.

3. Проведенные теоретические исследования с применением нескольких БАК – колебаний показывают, что КПД существующих однолучевых клистронов в ускорительной технике может быть выше 80% за счёт БАК – технологии группировки электронов при сохранении габаритов клистронных усилителей. Проведенное сравнение БАК – метода группировки электронов с двумя колебаниями ядра и СОМ – метода группировки в клистронах с одинаковой высокой эффективностью, работающих на одной и той же частоте при одном и том же питающем напряжении, показывает возможность значительного уменьшения длины группирователя, что позволяет использовать предлагаемый способ на практике без увеличения массы и габаритов клистрона.

4. Проведенный трёхмерный анализ процессов в многолучевом клистроне показал, что основными физическими ограничениями эффективности многолучевого клистрона являются интерференция волн в сверхразмерных кольцевых выходных резонаторах,

недостаточный уровень фокусирующего магнитного поля и влияние пространственного заряда.

Все результаты, выносимые на защиту в диссертационной работе, впервые получены диссертантом. Разработанные методы и модели прошли успешное подтверждение в эксперименте. Результаты диссертационной работы внедрены в практику клистронных технологий.

Степень обоснованности научных положений и достоверность полученных результатов

Автором изучены и критически проанализированы известные методы группировки электронов, последние достижения клистронных технологий по всему миру, опубликованные в литературе по вакуумной электронике. Список использованной литературы содержит 134 наименований.

Достоверность результатов работы обеспечивается экспериментами, проведёнными с двумя образцами разработанных многолучевых клистронов с выходной мощностью 6 МВт в S – диапазоне частот, а также теоретическими расчётами с использованием одномерных, двумерных и трёхмерных программ, которые применяются при разработке современных однолучевых и многолучевых клистронов.

Все эти результаты опубликованы в открытой печати, в том числе, в рецензируемых журналах, включенных в Перечень ВАК, и удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова. Результаты работы докладывались и обсуждались на научных российских и международных конференциях и семинарах.

Ценность для науки и практики результатов работы

Достигнутый на практике уровень эффективности мощных многолучевых клистронов значительно (на 15-20%) превышает КПД лучших отечественных и зарубежных аналогов. Результаты позволяют заметно уменьшить рабочие напряжения по сравнению с однолучевыми аналогами, тем самым снизить уровень рентгеновского излучения со стороны коллектора, а также размеры и габариты источников питания. Применение постоянных магнитов с периодической фокусировкой, заменяющие фокусирующий соленоид, позволяют избежать энергопотребления магнитной системой. Разработанные в диссертации подходы и предложения с применением различных программных комплексов, используемых для практической реализации клистронов, можно внедрять для увеличения выходной мощности и эффективности существующих однолучевых и многолучевых клистронов. Предложенная автором трёхмерная модель

многолучевого клистрона может быть применена для изучения пространственного группирования многолучевого электронного потока и процессов усиления сигнала.

Замечания по диссертационной работе

1) Нет информации о параметрах многолучевой электронной пушки, формирующей электронные пучки в рассматриваемых конструкциях клистронов.

2) В диссертационной работе не уделено внимание составу, долговечности, температурным режимам катодов многолучевой электронной пушки в решаемых при построении БАК – клистронов задачах, рассмотренных в главе 4.

3) Не проведено сравнение результатов испытаний разработанных БАК – клистронов с многолучевыми зарубежными аналогами.

4) Результат численных расчетов эффективности усиления, проведенный с использованием трехмерной модели многолучевого клистрона заметно отличается от результатов, полученных в эксперименте.

5) Не проведено исследование процессов усиления в трёхмерной модели многолучевого клистрона с нарастающим значением внешнего магнитного поля.

Указанные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации.

Заключительная оценка

Диссертационная работа Егорова Романа Владимировича является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном и техническом уровне. Представленная работа вносит значительный вклад в развитие вакуумной СВЧ электроники. Полученные автором результаты имеют новый уровень, являются достоверными, а выводы и заключения обоснованы результатами экспериментальных испытаний первых в мире БАК – клистронов. Результаты работы своевременно опубликованы в 13 печатных трудах, 7 из которых – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова. Диссертация полностью соответствует заявленной специальности 01.04.03 – «Радиофизика». Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертационного исследования. Диссертация оформлена хорошо, материал изложен ясно. Диссертационная работа отвечает требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а автор Егоров Роман Владимирович заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика» (п. 1 паспорта специальности).

Официальный оппонент

Заместитель заведующего кафедрой вакуумной электроники

Федерального государственного автономного образовательного

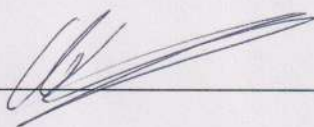
учреждения высшего образования «Московского физико-технического института

(национальный исследовательский университет)»

профессор, доктор физико-математических наук

Тел. +7 (495) 408-59-44, E-mail: sheshin.ep@mipt.ru

141700, Московская область, г. Долгопрудный, МФТИ Институтский переулок, д. 9



Шешин Евгений Павлович

Подпись зам. Заведующего кафедрой вакуумной электроники, д.ф.-м.н., профессора Е.П. Шешина заверяю:

21» ноября

2019

Ученый секретарь МФТИ



Скалько Юрий Иванович