

На правах рукописи



Нгуен Минь Туан

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В КОАКСИАЛЬНЫХ И ПЛАНАРНО-КОАКСИАЛЬНЫХ
ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ТРИОДАХ**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Томск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Коваль Тамара Васильевна

Официальные оппоненты: Медведев Юрий Васильевич
доктор физико-математических наук, профессор,
Национальный исследовательский Томский
государственный университет,
профессор кафедры радиоэлектроники

Винтизенко Игорь Игоревич
доктор физико-математических наук,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
заведующий лабораторией №53, ФТИ, НИ ТПУ

Ведущая организация: Институт сильноточной электроники СО РАН
(г. Томск)

Защита диссертации состоится «05» декабря 2012 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан: «__» 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических

наук, доцент:

А.В. Кожевников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. СВЧ-генераторы с виртуальным катодом (ВК) – виркаторы, отдельный класс приборов, среди которых отражательные триоды с ВК (или триоды с ВК), являются СВЧ-устройствами генерации мощных импульсов (десятки мегаватт) электромагнитного излучения в дм-см диапазоне длин волн.

Отражательные триоды характеризуются простой конструкцией, возможностью работать без внешнего магнитного поля, относительной легкостью перестройки частоты и режима генерации, работой на токах, превышающих предельный вакуумный ток. В таком генераторе при формировании ВК пространственно-временные колебания ВК и осцилляторное движение электронов пучка обуславливают генерацию электромагнитных колебаний. В триоде с ВК эффективное взаимодействие электронов пучка с полем СВЧ-волны обеспечивается благодаря тому, что формирование пучка и ВК, а также возбуждение СВЧ-поля происходит в одном и том же объеме, являющемся одновременно электродинамической системой генератора. Поэтому при конструировании генератора выбор моды, с которой будет осуществляться взаимодействие пучка, является важным условием.

Разработкой и исследованием виркаторов занимаются в России и за рубежом в США, Франции, Китае. В настоящее время разработаны виркаторы с плоскопараллельными электродами и коаксиальные виркаторы с радиально сходящимся пучком. В отражательном триоде с плоскопараллельными электродами СВЧ излучение является многомодовым, что ограничивает применение триода с ВК на практике.

В виркаторе коаксиального типа с радиально сходящимся пучком легче осуществить одномодовый режим генерации. Однако при возбуждении аксиально-симметричной волны TM_{01} уровень мощности СВЧ излучения существенно зависит от однородности распределения пучка по углу, который при работе катода в режиме взрывной эмиссии осуществить практически проблематично. Коаксиальный виркатор с радиально сходящимся несимметричным пучком разработан для генерации излучения на основном типе колебаний TE_{11} . Однако в таком генераторе при формировании двух ВК в пространстве дрейфа цилиндрического резонатора наличие пролетных электронов затрудняет получение эффективной одномодовой генерации. Таким образом, получение одномодовых режимов излучения электромагнитных колебаний генераторов с ВК остается актуальной задачей.

В диссертационной работе проведено теоретическое и численное исследование генерации электромагнитного излучения в планарно-коаксиальном и коаксиальном триодах с ВК. Определены условия одномодовых режимов генерации. Экспериментально получена одномодовая генерация электромагнитных колебаний в отражательных триодах: планарно-коаксиальном и коаксиальном с радиально расходящимся электронным пучком.

Диссертация выполнена на кафедре прикладной математики Института кибернетики и в лаборатории № 42 Физико-технического института (ФТИ)

Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) в соответствии с планом госбюджетных научно-исследовательских работ по теме: «Исследование электромагнитного излучения в коаксиальных и планарно-коаксиальных отражательных триодах».

Цели и задачи исследования. Цель работы - теоретическое и экспериментальное исследование одномодовой генерации электромагнитных колебаний в коаксиальном и планарно-коаксиальном отражательных триодах с радиально расходящимся пучком.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи исследования.

1. Теоретическое исследование электродинамических характеристик отражательных триодов и уровня взаимодействия колебаний ВК с электромагнитными полями резонансных систем. Определение условий одномодовой генерации на TE_{11} и ТЕМ волнах.

2. Численное исследование методом крупных частиц формирования ВК и возбуждения электромагнитных колебаний в отражательных триодах.

3. Экспериментальные исследования влияния ширины пучка на характеристики излучения коаксиального отражательного триода со сходящимся пучком.

4. Экспериментальные исследования генерации электромагнитного излучения планарно-коаксиального и коаксиального отражательных триодов с расходящимся пучком.

Научная новизна работы. Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, состоит в следующем.

1. На основе теоретического исследования сформулированы условия одномодовых режимов генерации планарно-коаксиального и коаксиального отражательных триодов.

2. Численно с помощью электромагнитного кода KARAT продемонстрирована возможность генерации электромагнитных колебаний отражательных триодов планарно-коаксиального и коаксиального с радиально расходящимся пучком.

3. Экспериментально получено излучение волны TE_{11} планарно-коаксиального отражательного триода.

4. Экспериментально получено излучение волны TM_{01} коаксиального отражательного триода волны TM_{01} при возбуждении неустойчивости радиально расходящегося аксиально-симметричного пучка на ТЕМ волне в коаксиальной области отражательного триода.

Практическая значимость. Результаты, приведенные в диссертационной работе, применялись при экспериментальном исследовании процесса генерации СВЧ на высоком уровне мощности в лаборатории № 42 ФТИ НИ ТПУ и могут быть использованы при:

- разработке новых высокоэффективных приборов на основе систем с ВК и проведении на них экспериментов.
- разработке и создании диагностики мощных импульсов СВЧ излучения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Взаимодействие с ТЕМ волной осуществляется аксиально-симметричным расходящимся пучком в неоднородной области коаксиального отражательного триода. Трансформация волны ТЕМ в волну TM_{01} происходит в цилиндрической области триода с коэффициентом прохождения волны порядка единицы на частоте 3 ГГц.

2. Взаимодействие с волной TE_{11} осуществляется несимметричным пучком в отражательном триоде планарно-коаксиальной конфигурации. Коэффициент прохождения волны TE_{11} на частоте 3 ГГц $\sim 0,8$.

3. Диагностика неоднородности аксиально-симметричного пучка может проводиться из сравнения расчетной и экспериментальной ДН.

4. Мощность излучения в коаксиальных отражательных триодах имеет периодическую зависимость от расстояния между пучком и отражателем и экстремальную зависимость от ширины эмиссионной поверхности катода.

5. Коаксиальный отражательный триод при условиях аксиальной симметрии расходящегося пучка и резонансного взаимодействия колебаний ВК с ТЕМ волной в коаксиальной области триода может работать в режиме одномодовой генерации волны TM_{01} .

6. Планарно-коаксиальный отражательный триод при выполнении условий на размеры пучка, местоположение катодов и резонансного взаимодействия колебаний ВК с волной TE_{11} может работать в режиме одномодовой генерации.

Личный вклад автора: проведение численных расчетов и экспериментов, разработка резонансной системы коаксиального отражательного триода, анализ экспериментальных и теоретических результатов, формулирование научной новизны, защищаемых положений и выводов.

Апробация результатов. Материалы диссертационной работы обсуждались на научных семинарах кафедры прикладной математики ИК ТПУ и доложены на следующих конференциях: 16th (17th) International Symposium on High Current Electronics, Tomsk 2010 (2012); VIII (IX) Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии», Томск 2010 (2011); VI International Conference of students and young scientists «Prospects of Fundamental Sciences Development», Tomsk 2010; V Всероссийская научно-практическая конференция «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» – Томск 2012; The 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST2012), Tomsk 2012.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 12 печатных трудах, включая 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, рекомендуемых для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата наук.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 101 страницах, включает 6 таблиц, 54 рисунков. Состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 68 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, проведен краткий обзор литературы, сформулирована цель, обозначены решаемые задачи, выделены основные положения, выдвигаемые на защиту.

В первой главе проводится численное исследование электродинамических характеристик коаксиального и планарно-коаксиального отражательных триодов, передачи электромагнитной энергии в электродинамической структуре триода и ДН выходного излучения. Проводится теоретическое исследование взаимодействия колебаний ВК с электромагнитными полями резонансной системы коаксиального отражательного триода. С применением метода крупных частиц (PIC код КАРАТ) исследуется формирование ВК и генерация электромагнитного излучения в отражательных триодах.

1. Электродинамические системы отражательных триодов являются неодносвязными в области взаимодействия пучка с полем системы. В этой области могут возбуждаться волны типа ТМ, ТЕ и ТЕМ.

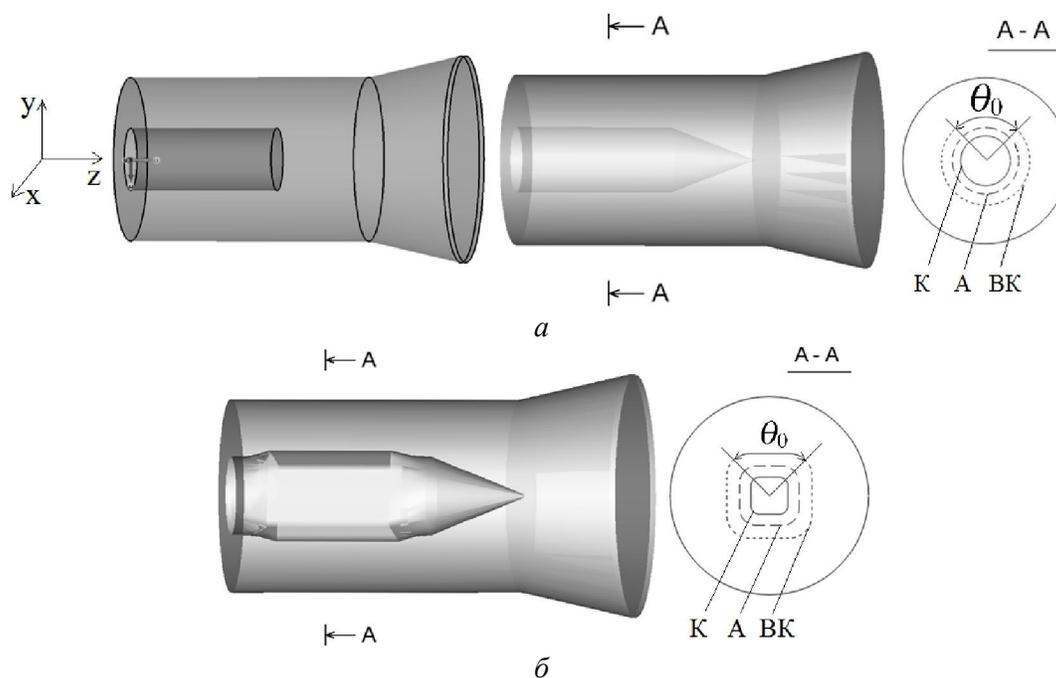


Рис 1. Схемы электродинамических систем коаксиального (а) и планарно-коаксиального (б) отражательных триодов; А – анод, К – катод, ВК – виртуальный катод.

На рис. 1 показаны модели электродинамических структур триодов, которые не являются однородными вдоль продольной координаты z и состоят из отрезков волноводных линий: коаксиальной, планарно-коаксиальной и цилиндрической, в каждой из которых свои критическая частота и распределение поля. Исследование структуры собственных полей и частот проведено с помощью численного решения уравнения Гельмгольца.

Зависимость критической частоты нескольких первых типов волн от внешнего радиуса системы показана на рис. 2а и от радиуса внутреннего электрода на рис. 2б. Как видно из рис. 2а, критическая частота волны TE_{11} в планарно-коаксиальной линии ($R_2=17,5$ см) равна критической частоте в цилиндрической области, т.е. в области выходного окна рупора ($R_2=22$ см). Из рис. 2б видно, что при возбуждении аксиально-симметричной волны TM_{01} ($f_{кр.}=1,58$ ГГц) в неодносвязной области триода она будет трансформироваться в волну TM_{02} ($f_{кр.}=1,5$ ГГц) на границе областей коаксиал-цилиндр (рис. 1а). Так как волны TEM и TM_{01} имеют близкие конфигурации полей, то излучение волны TM_{01} можно реализовать при возбуждении TEM волны в неодносвязной области коаксиального триода с ее последующей трансформацией в волну TM_{01} в цилиндрической области триода.

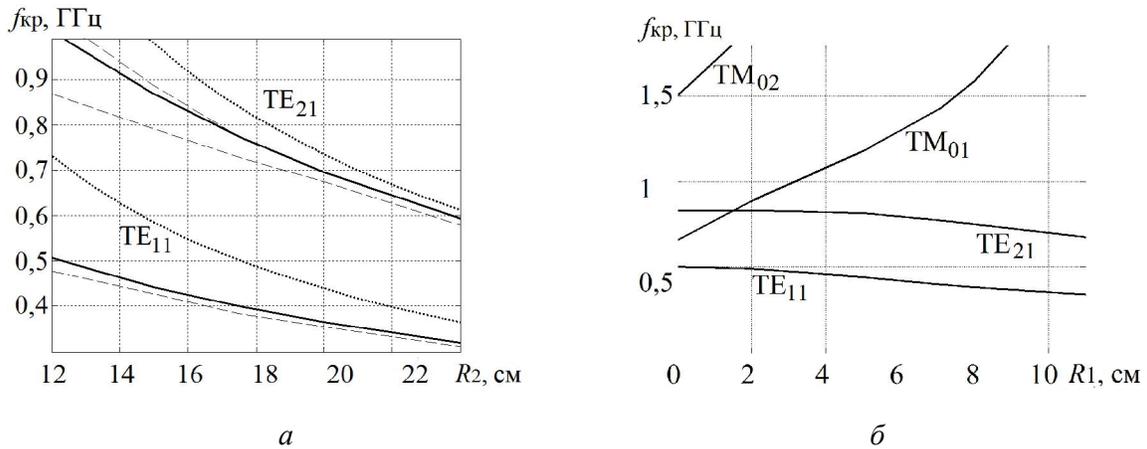


Рис. 2. Зависимость критической частоты от радиуса внешнего электрода в линиях: коаксиальной (—), планарно-коаксиальной (---) и цилиндрической (···) (а) и от внутреннего радиуса коаксиальной линии (б).

Из численного решения трехмерного уравнения Гельмгольца получены резонансные частоты f_v и распределение поля волн в резонансных системах отражательных триодов. Для диапазона частот 2,5...3,5 ГГц резонансные частоты волны TE_{11} : $f_v=2,57$; 2,77 и 2,99 ГГц. На рис. 3 для двух значений частот 3 и 3,74 ГГц показано распределение E_x компоненты электрического поля

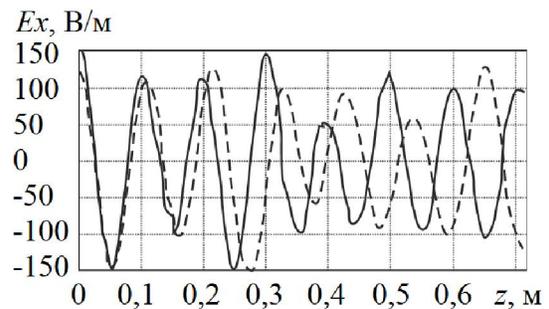


Рис. 3. Распределение E_x компоненты электрического поля вдоль продольной координаты при $f=3$ ГГц (сплошная линия) и $f=2,74$ ГГц (пунктирная линия)

волны TE_{11} вдоль оси коаксиального отражательного триода (рис. 1б). Для эффективного взаимодействия пучка с волной пучок должен располагаться между узлами стоячей волны резонансной системы отражательного триода.

2. В отражательных триодах при переходе от коаксиальной конфигурации к цилиндрической или рупорной антенне происходит отражение и преобразование волн в высшие типы волн. Исследование коэффициента прохождения S для разных типов волн через электродинамическую систему триодов показало, что в коаксиальной системе коэффициент передачи волны TE_{11} на частоте 3 ГГц $S \sim 0,8$, а волны ТЕМ (с последующей трансформацией ее в TM_{01}) $S > 0,9$.

3. Численное исследование ДН в дальней зоне позволяет определить модовый состав электромагнитного излучения и провести диагностику неоднородности пучка в отражательном триоде. Азимутальная неоднородность электронного пучка в результате исходной неоднородности эмиссионной поверхности цилиндрического катода, а также некоторая разъюстировка системы могут обусловить одновременное возбуждение волн ТЕМ и TE_{11} . Из рис. 4 видно, что при прохождении двух волн ТЕМ + TE_{11} через электродинамическую систему влияние волны TE_{11} становится заметным по отсутствию провала на ДН.

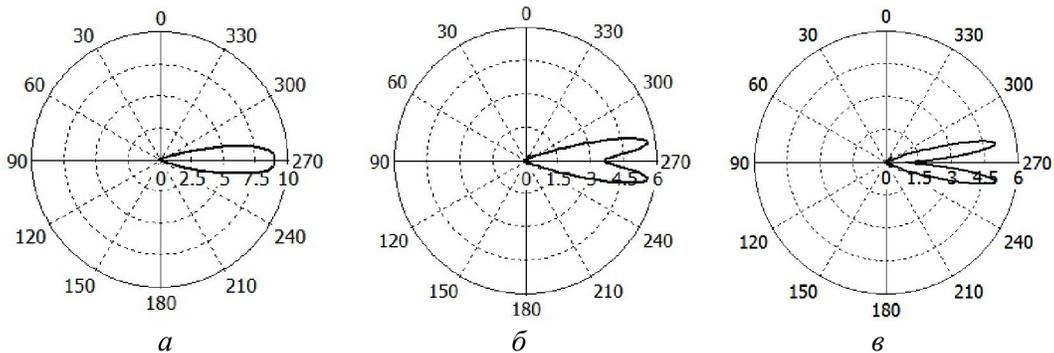


Рис. 4. ДН по мощности излучения двух волн коаксиального отражательного триода: $a - E_{ТЕМ} + E_{TE_{11}} = 0,5 + 0,5$; $b - 0,8 + 0,2$; $v - 0,95 + 0,05$

4. Для исследования стационарного состояния релятивистского электронного потока в вакуумном диоде численно решалось уравнение Пуассона. В нерелятивистском приближении, $e\phi_0/mc^2 \ll 1$ плотность тока на радиусе r коаксиального диода записывается в виде

$$j = \frac{\sqrt{2}}{9\pi} \sqrt{\frac{e}{m_0}} \frac{\phi_0^{3/2}}{r^2 g^2(r/R_C)}, \quad g(b) = b - \frac{2}{5}b^2 + \frac{11}{120}b^3 - \frac{47}{3300}b^4 + \dots \quad (1)$$

Здесь $b = \ln(r/R_C)$, R_A и R_C - радиусы анода и катода, ϕ_0 - потенциал, e и m_0 - заряд и масса электрона. При $|\ln(R_A/R_C)| \ll 1$ формула (1) переходит в хорошо известный закон Чайлда-Ленгмюра для плоского диода.

Рассматривая ВК как пространственно распределенный осциллятор, совершающий колебания относительно среднего положения с частотой, равной когерентным колебаниям электронов, и зависящей только от плотности пространственного заряда, проведено теоретическое исследование уровня взаимодействия колебаний ВК с электромагнитным полем резонансной системы отражательного триода. Получены геометрические функции G для волн TE, TM и TEM, характеризующие уровень взаимодействия колебаний ВК с электромагнитным полем резонатора и исследованы зависимости G от геометрии системы и пучка, типа возбуждаемой волны. На рис. 5 показана зависимость геометрической функции волн излучения TE₁₁ и TEM волн от центрального угла θ_0 (рис. 1), связанного с размерами катода.

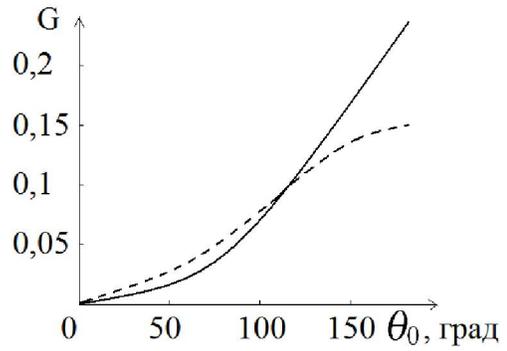


Рис. 5. Зависимость геометрической функции G излучения волн TE₁₁ (- -) и TEM (—) от угла θ_0

Из проведенных расчетов следует, что в отражательном триоде, для эффективного взаимодействия пучка с волной TE₁₁ необходимо использовать аксиально-несимметричный пучок с шириной катода $L_K \leq (\pi/2)R_K$. Для уменьшения влияния краевых эффектов, приводящих к рассыпанию пучка, лучше использовать планарную конфигурацию диода. При центральном угле $\theta_0 > 2\pi/3$, как видно из рис. 5, геометрическая функция и, следовательно, уровень взаимодействия колебаний ВК с волной TEM становится выше, чем с волной TE₁₁. Поэтому развитие неустойчивости на TEM волне можно обеспечить расходящимся аксиально-симметричным пучком, который будет сформирован в отражательном триоде коаксиальной конфигурации.

5. С помощью релятивистского 2-х и 3-х мерного PIC кодов КАРАТ проведено исследование формирования ВК и генерации электромагнитных колебаний в отражательных триодах коаксиальной и планарно-коаксиальной конфигураций. Показано, что в отражательных триодах при формировании ВК устанавливается квазистационарный режим колебаний ВК. Частота колебаний ВК зависит от плотности пространственного заряда в области ВК.

В численных расчетах рассматривались резонансные системы с внешним радиусом $R=17,5$ см; радиус анода R_A и катода R_K коаксиального триода со сходящимся пучком $R_A = 5,4$ см, $R_K = 7,1$ см; триода с расходящимся пучком $R_A = 6,7$ см и $R_K = 5,5$ см; в планарно-коаксиальном триоде ширина катода $L_K=4$ см, длина $h=5$ см; ускоряющее напряжение 450 -500 кВ, прозрачность анода 70%.

На рис. 6 показаны расчетные системы и конфигурационные портреты электронных пучков в отражательных триодах. В планарно-коаксиальном отражательном триоде, как было показано выше, для увеличения мощности излучения можно использовать два пучка, если колебания ВК и движение электронов будут синхронны изменениям амплитуды стоячей волны TE₁₁. Это

будет иметь место, если катоды расположены в противоположных плоскостях и смещены относительно друг друга на длину стоячей полуволны (рис. 6а) в резонаторе триода, либо катоды расположены в одной плоскости и расстояние между ними равно длине стоячей волны (рис. 6б). В расчетах среднее значение тока в каждом диодном промежутке составляло 12,5 кА. Частота колебаний тока анода и колебаний ВК были равны 3 ГГц.

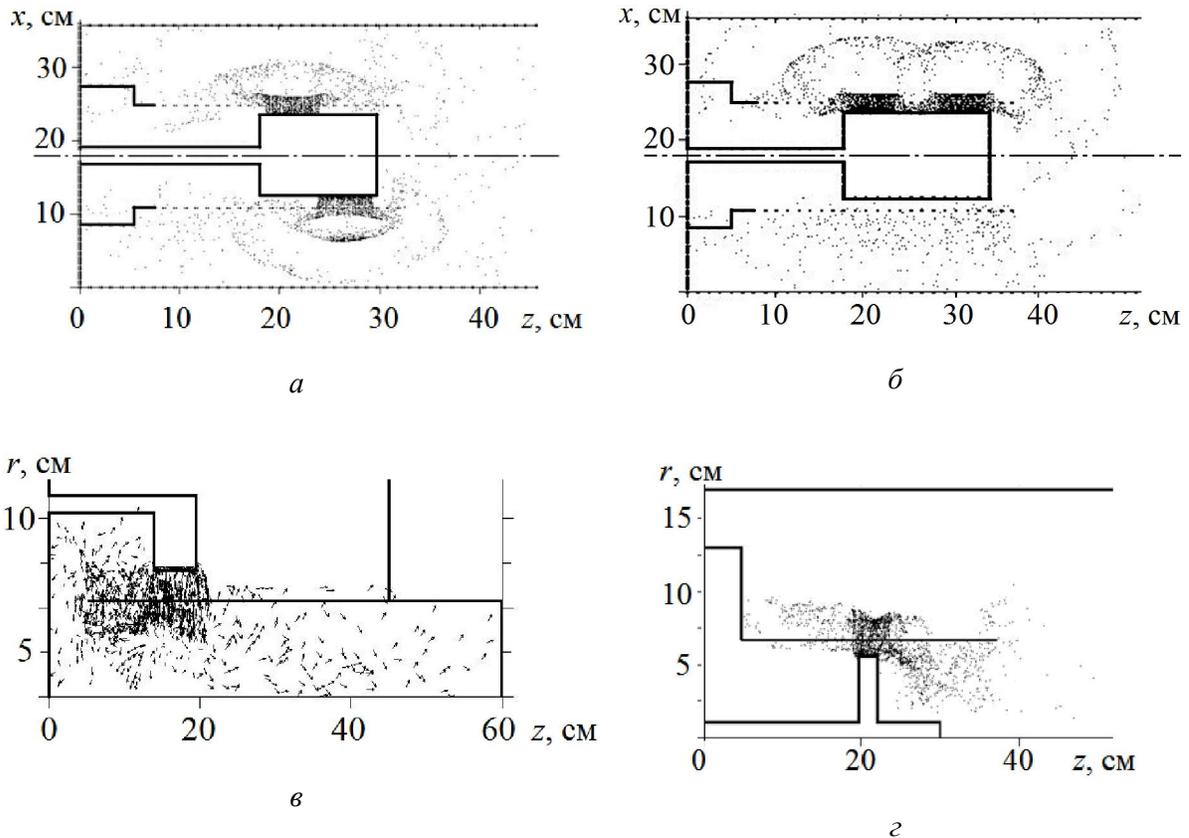


Рис. 6. Конфигурационные портреты пучков в планарно-коаксиальном (а, б) и коаксиальных отражательных триодах со сходящимся (в) и расходящимся пучком (г)

В коаксиальном отражательном триоде проведено численное исследование влияния на ток триода ширины эмиссионной поверхности катода h . Показано, что в коаксиальном триоде со сходящимся пучком при $h > 2$ см и с расходящимся пучком при $h > 3$ см ток и частота колебаний ВК практически не зависят от ширины пучка. Краевые эффекты и собственное магнитное поле определяют характер зависимостей на рис. 7, в отличие от линейной зависимости $I(h) = j 2\pi R_A h$, которую дает одномерная теория (1).

Частота излучения совпадает с частотой колебаний ВК и при изменении h в

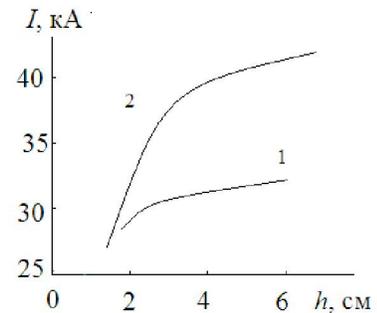


Рис. 7. Зависимости тока коаксиального отражательного триода от ширины катода: 1 – сходящийся пучок, 2 – расходящийся пучок

коаксиальных триодах (рис. 6*в, з*) меняется в интервале 2,9-3,2 ГГц. При этом мощность излучения, как показали численные расчеты, имеет зависимость с максимумом от h . Максимум мощности в коаксиальном триоде со сходящимся пучком получен при $h=5$ см и в коаксиальном триоде с расходящимся пучком при $h=2,5$ см. Такая зависимость обусловлена влиянием собственного магнитного поля пучка на ток пучка и на траектории электронов пучка.

Численные расчеты показали, что мощность излучения коаксиального отражательного триода зависит от местоположения пучка относительно отражателя, и имеет периодическую зависимость от расстояния отражатель-пучок.

На рис. 8 показаны расчетные спектр частот, импульсы мощности пучка в области анод-ВК и мощности излучения на выходе из коаксиального отражательного триода с расходящимся пучком (рис. 6*з*).

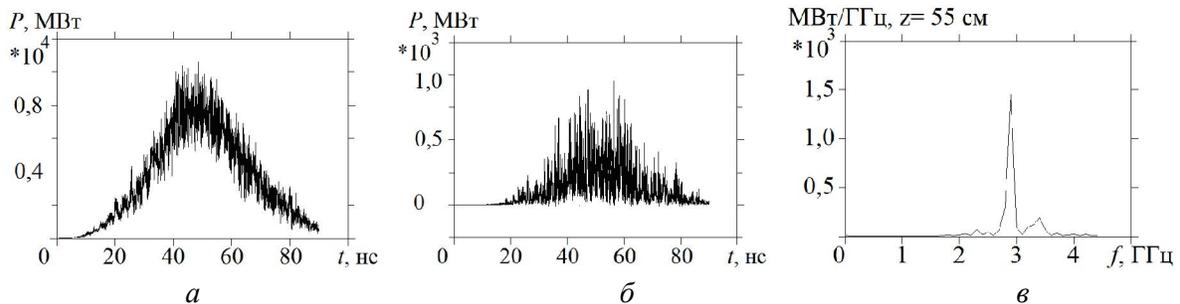


Рис. 8. Импульсы мощности пучка (*а*), мощности излучения (*б*) и спектр частот (*в*)

Таким образом, теоретические и численные исследования показали возможность возбуждения неустойчивости электромагнитных колебаний в планарно-коаксиальном отражательном триоде на TE_{11} волне и в коаксиальном отражательном триоде на TEM волне с последующей трансформацией ее в TM_{01} волну.

Во второй главе проводится экспериментальное и численное исследование влияния ширины катода на ток и характеристики излучения отражательного коаксиального триода с радиально сходящимся электронным пучком. Проводится сравнение с экспериментами других авторов.

Источником импульсного высокого напряжения наносекундного диапазона в экспериментах являлся сильноточный электронный ускоритель прямого действия на базе двойной формирующей линии, схема которого показана на рис. 9. Базовые параметры выходного импульса – напряжение до 600 кВ, длительность импульса на полувысоте 90 нс.

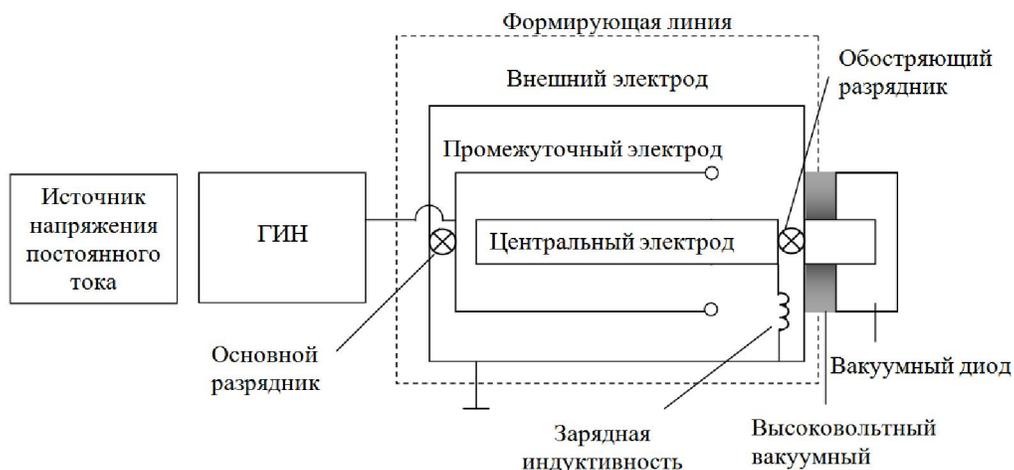


Рис. 9. Схема источника импульсного высокого напряжения

Схема экспериментальной установки, показана на рис. 10. Центральной частью экспериментальной установки является коаксиальный диод с анодом в виде сетки из нержавеющей стали. Дискотый катод с помощью катододержателя соединялся с высоковольтным отрицательным электродом ускорителя. Конструкция катода позволяла изменять ширину h эмиссионной поверхности катода.

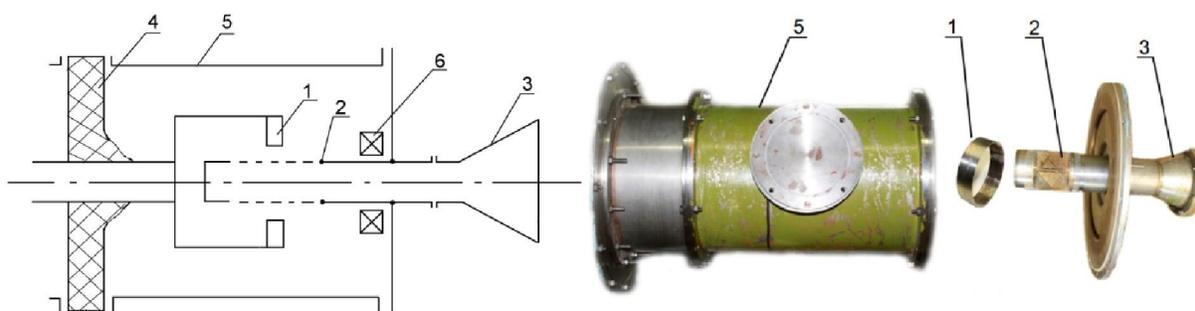


Рис. 10. Схема и элементы экспериментальной установки. 1–катод; 2–анод-сетка с волноводом; 3–антенна; 4–изолятор ускорителя; 5–вакуумная камера; 6–пояс Роговского

Измерение импульсного тока, протекающего по аноду-сетке, осуществлялось поясом Роговского, размещенным на торцевой стенке камеры. Для регистрации электромагнитного излучения в дальней зоне антенны устанавливались приемники излучения.

При катод-анодном промежутке 17 мм были воспроизведены режимы с осциллирующим электронным потоком (прозрачность сетки 0,7) и диодный режим со сплошным анодом. Получен ток отражательного триода на 10% меньше тока диода (рис. 11). Следует отметить, что в плоском отражательном триоде ток анода (при такой же прозрачности анода) отличался от тока диода на 25%. Это означает, что число электронов, осциллирующих в области катод–ВК в коаксиальном триоде меньше, чем в планарном, и соответственно, группировка электронов по фазе колебаний меньше. От числа электронов, резонансно взаимодействующих с электромагнитной волной, зависит уровень мощности когерентного излучения.

Измерения СВЧ излучения, генерируемого в режиме работы с осциллирующим электронным потоком, проводились на оси триода и на таком же расстоянии на углу 30° . Проведены экспериментальные исследования зависимости мощности, тока отражательного триода и частоты излучения от размера катода. Экспериментально показано, что при изменении ширины эмиттера h от 2 см до 5,5 см ток триода практически не менялся (от 29 до 30 кА), частота излучения изменялась от 2,6 до 3 ГГц, однако увеличение плотности мощности излучения при этом происходило в 7-10 раз. Экспериментально при $h=5,5$ см получена плотность мощности излучения отражательного триода до 10 Вт/см^2 на углу 30° и 3 Вт/см^2 на оси системы при длительности импульса 60 нс (на половинном уровне мощности) с частотой 3 ГГц.

Результаты численного исследования влияния ширины катода на ток (рис. 7) хорошо согласуются с экспериментом. На рис. 12 показан расчетный спектр электрического поля в коаксиальном отражательном триоде (рис. 6в) для параметров эксперимента.

Таким образом, в коаксиальном отражательном триоде со сходящимся пучком увеличение мощности пучка (\sim в 7 раз) при увеличении ширины катода (с 2 до 5,5 см) происходит при практически постоянном токе триода и частоте генерации.

В третьей главе проводится теоретическое и экспериментальное исследование генерации электромагнитного излучения в планарно-коаксиальном триоде с ВК. Цель создания такой конструкции заключалась в том, что новая система включает в себе преимущества отражательного триода с плоскими электродами и коаксиального отражательного триода с радиальным пучком. Наибольший интерес к такой системе связан с возможностью генерации аксиально-несимметричной волны TE_{11} , которая формирует в свободном пространстве ДН излучения с одним максимумом по оси передающей антенны генератора без дополнительных преобразующих устройств. Схема триода и внешний вид анода и катода показаны на рис. 13.

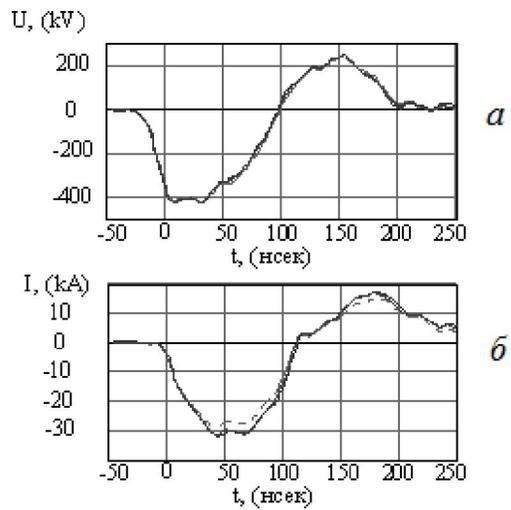


Рис. 11. Осциллограммы импульсов напряжения (а), тока пояса Роговского (б) сплошная линия – диод; штриховая линия – триод; $h = 5,5$ см

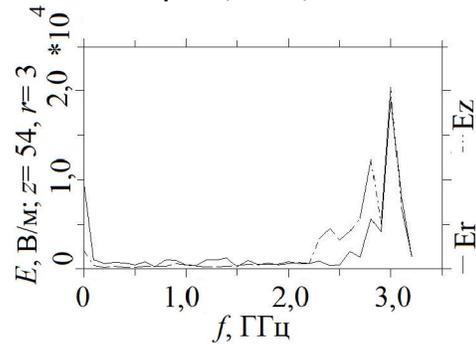


Рис.12. Спектр электрического поля вирокатора

Триод представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру 2, внутри которой располагается катодный узел 5 и сеточный анод 6. Катодный узел расположен внутри анода. В рассматриваемом триоде с ВК возможно использование до четырех плоскопараллельных катод-анодных промежутков, сеточные аноды которых соединяются в квадратную призму с закругленными ребрами. С обеих сторон призма переходит в полые цилиндры и таким образом образуется внутренний проводник коаксиальной электродинамической системы. Для согласования коаксиальной системы с рупорной антенной 4 на конце полого цилиндра со стороны антенны устанавливается конус-трансформатор типа волны 3. К аноду 6 прикладывается импульс высокого положительного напряжения. Катодный узел находится под потенциалом «земли». Под действием высокого напряжения с катода эмитируются электроны, которые проходят через сеточный анод и за анодом формируют ВК. С формированием ВК электроны пучка начинают совершать осцилляционное движение, в результате чего начинает осциллировать ВК на частоте осцилляций электронов и возникает СВЧ-излучение, которое выводится в свободное пространство через рупорную антенну.

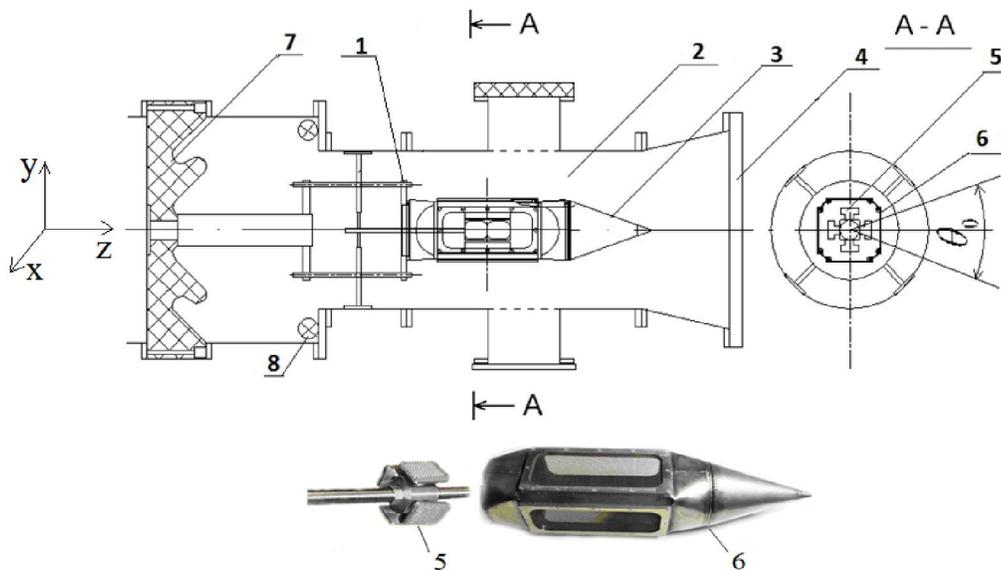


Рис. 13. Элементы и схема планарно-коаксиального триода с ВК. 1 - отражатель; 2 - вакуумная камера; 3 - трансформатор типа волны; 4 - выходное окно; 5 - катод; 6 - анод-сетка; 7 - изолятор ускорителя; 8 – пояс Роговского

Как следует из проведенных теоретических исследований для эффективного возбуждения волны типа TE_{11} в планарно-коаксиальном триоде необходимо использовать аксиально-несимметричный пучок. Катоды длиной $h=5$ см, шириной $L_C=4$ см выбирались исходя из полученных условий ограничения: $L_C \leq (2\pi/3)R_K$ (рис. 5) и $h < \lambda/2$, λ - длина волны в резонансной системе. Экспериментально было проведено исследование мощности излучения от количества катодов, от их расположения относительно друг друга и относительно выходного окна рупорной антенны. Показано, что оптимальное

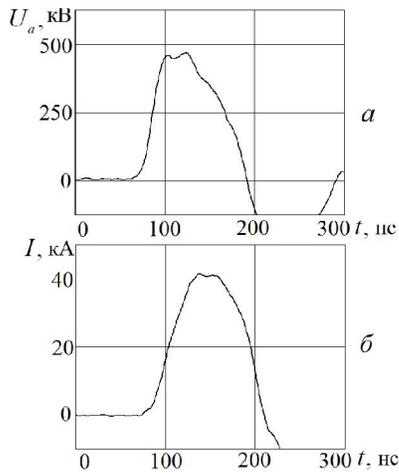


Рис. 14. Осциллограмма импульсов напряжения U_a (а), тока I (б) в триоде

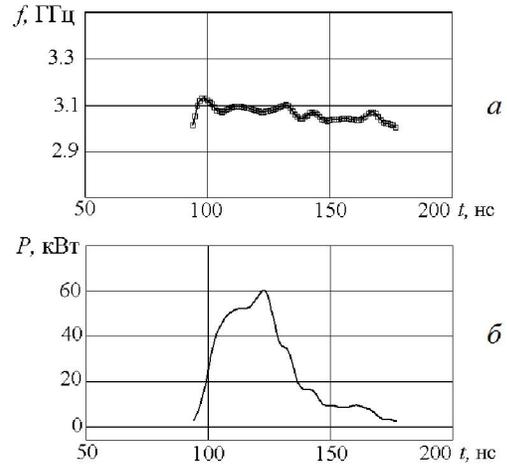


Рис. 15. Зависимость частоты f (а) и мощности излучения P (б) от времени t .

положение катода в камере триода в эксперименте соответствует совпадению координат середины ВК и максимума стоячей волны TE_{11} .

На рис. 14 показаны осциллограммы напряжения U_a (14а), тока I (14б) в триоде при катод-анодном промежутке $d = 1.2$ см. На рис. 15 показаны зависимости частоты f (15а) и мощности излучения P (15б) на оси системы от времени.

Теоретически и экспериментально показано, что для увеличения мощности излучения можно использовать два пучка, если колебания ВК и движение электронов будут синхронны изменениям амплитуды стоячей волны. Это будет иметь место, если катоды расположены в противоположных плоскостях и смещены относительно друг друга на длину стоячей полуволны (рис. 6а) в резонаторе триода, либо катоды расположены в одной плоскости и расстояние между ними равно длине стоячей волны (рис. 6б).

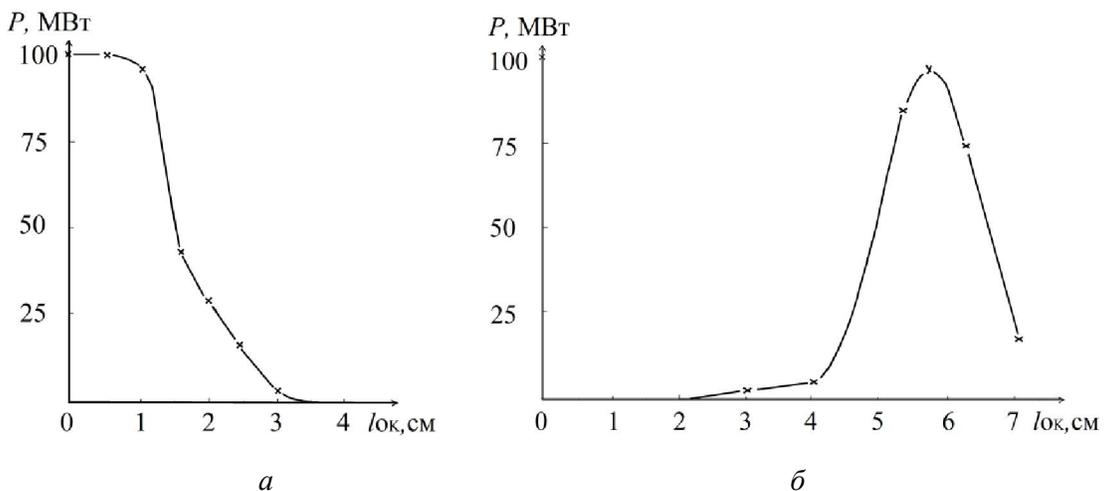


Рис. 16. Экспериментальные зависимости мощности излучения от расстояния между осями катодов (рис. 6а) и мощности излучения P от расстояния между катодами (рис. 6б)

На рис. 16 показаны результаты экспериментального исследования мощности излучения от расстояния между катодами при разном их расположении относительно друг друга (рис. 6). Максимальная мощность излучения в эксперименте получена при формировании двух пучков на уровне 100 МВт при длительности импульса излучения 60 нс при частоте генерации 3,1 ГГц.

Измерения поляризации волны в свободном пространстве показали, что она линейная и вектор электрического СВЧ-поля волны совпадает с направлением движения осциллирующих электронов пучка. На рис. 17 представлена экспериментально полученная диаграмма направленности электромагнитного излучения

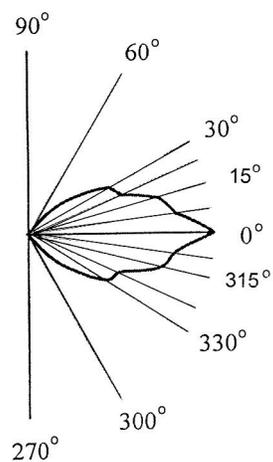


Рис. 17. ЛН излучения

Таким образом, полученная диаграмма направленности излучения с максимумом мощности вдоль оси распространения излучения, линейность поляризации электромагнитной волны, хорошее совпадение частоты генерируемого СВЧ излучения с собственной частотой волны типа TE_{11} в резонансной системе триода с ВК, позволяют утверждать, что генерация в данном триоде с ВК происходит на волне типа TE_{11} .

В четвертой главе проводится экспериментальное исследование генерации электромагнитного излучения в коаксиальном отражательном триоде с расходящимся пучком (рис. 18).

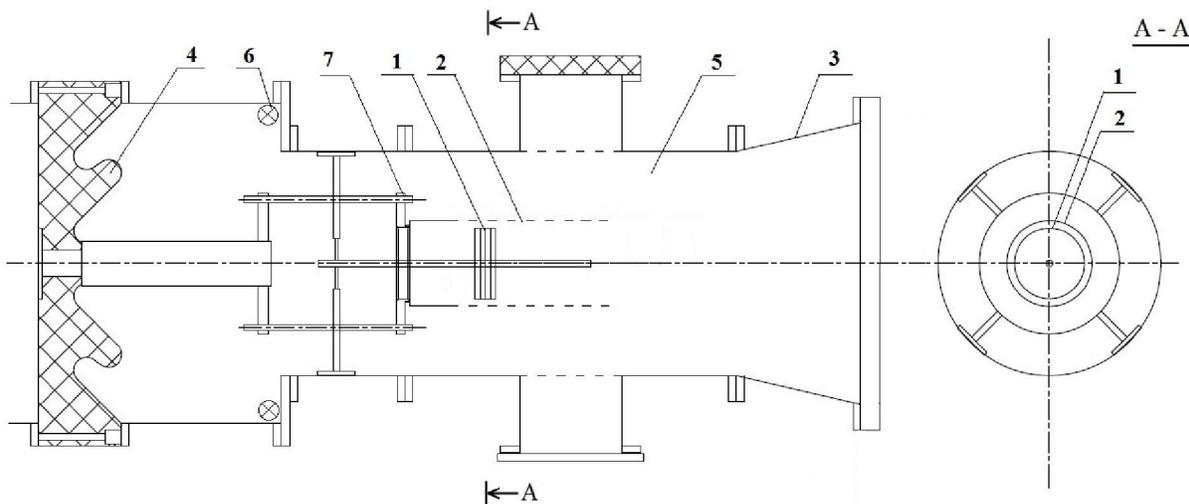


Рис. 18. Схема экспериментальной установки. 1 – катод; 2 – анод-сетка; 3 – выходное окно; 4 – изолятор ;5 – вакуумная камера; 6 – пояс Роговского; 7 – отражатель

Результаты эксперимента сравниваются с численными расчетами. В цилиндрической вакуумной камере внутри сеточного анода располагался катодный узел. Катод находился под потенциалом земли и был выполнен в виде диска диаметром 11 см, конструкция катода позволяла изменять ширину

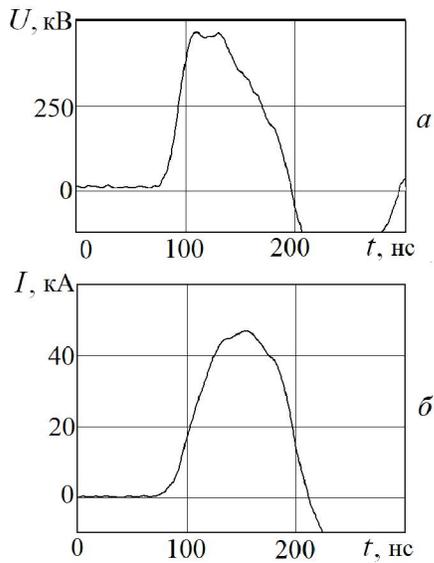


Рис. 19. Осциллограммы импульсов напряжения (а) и тока (б) в триоде

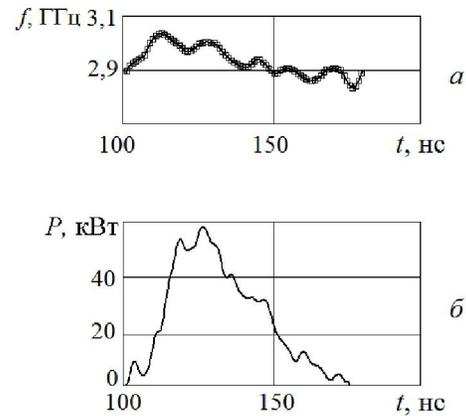


Рис. 20. Зависимость частоты (а) и мощности излучения (б) от времени

его эмитируемой поверхности от 0,8 до 4 см. Цилиндрический анод диаметром 13,4 см выполнен из металлической сетки с геометрической прозрачностью $\sim 0,7$ и находился под высоким положительным потенциалом, под действием которого с катода происходила эмиссия электронов, и за сеткой-анодом формировался ВК. Осцилляции электронов и ВК обуславливали СВЧ-излучение, которое выводилось в свободное пространство через рупорную антенну 3. Типичные осциллограммы импульсов напряжения и тока в триоде, огибающей импульса СВЧ излучения показаны на рис. 19. На рис. 20 представлены зависимости частоты и мощности излучения на приемной антенне от времени в течение процесса генерации.

Экспериментально было проведено исследование влияния размеров пучка, его местоположения относительно отражателя на ток отражательного триода и характеристики излучения. Экспериментально и численно показано, что при ширине катода $h > 2,4$ см ток триода практически не зависит от ширины катода. Зависимость мощности излучения от h имеет экстремум при $h = 2,4$ см (рис. 21).

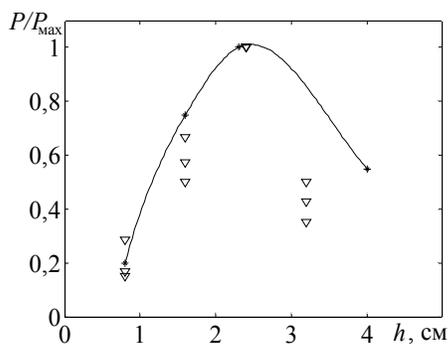


Рис. 21. Зависимость относительной мощности излучения от ширины катода: ∇ - эксперимент, * - расчет

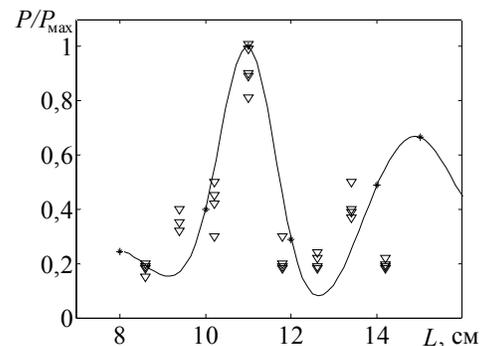


Рис. 22. Зависимость мощности излучения вилкатора от расстояния от центра пучка до отражателя: ∇ - эксперимент, * - расчет

При $h < 2,4$ см мощность излучения повторяет зависимость тока от h . При $h > 2,4$ см благодаря увеличению собственного магнитного поля происходит ограничение тока пучка за счет центральных электронов, увеличивается разброс электронов по амплитудам колебаний, что приводит к уменьшению мощности излучения.

Экспериментально и численно были проведены исследования влияния местоположение пучка относительно отражателя на параметры пучка и излучения. На рис. 22 показана зависимость мощности излучения от расстояния отражатель – центр пучка L . Как следует из эксперимента и численных расчетов, мощность излучения носит периодический характер от L . Это связано с тем, что в триоде при возбуждении неустойчивости симметричным электронным пучком формируется стоячая волна, и наибольшая мощность излучения соответствует местоположению пучка в максимуме электрического поля стоячей волны. Максимальная мощность излучения, полученная в эксперименте, достигала 260-300 МВт на частоте 3 ГГц.

Теоретически показано и экспериментально было установлено, что частота излучения увеличивается (до ~10%) при формировании пучка вблизи края анода. Это обусловлено влиянием краевых эффектов на траектории электронов и соответственно на плотность заряда в области ВК. Частота излучения в отражательных триодах связана с плотностью заряда в области ВК. На рис. 23 представлены экспериментальные ДН СВЧ излучения коаксиального отражательного триода.

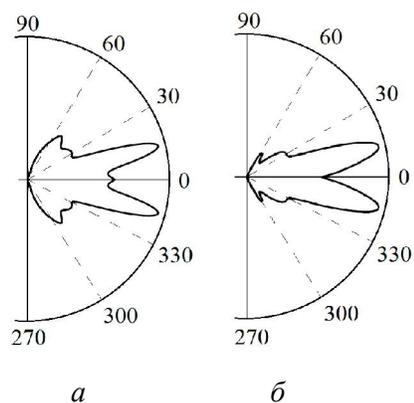


Рис. 23. Экспериментальные ДН излучения

Из сравнения расчетных (рис. 4) и экспериментальных ДН можно сказать, что в эксперименте присутствует некоторая асимметрия электронного пучка по азимуту, обуславливающая возбуждение волны TE_{11} наряду с волной TEM . При этом доля волны TE_{11} в экспериментах составляет менее 20%. Боковые лепестки на ДН могут быть связаны с дополнительным рассеянием волны на окне вывода энергии.

Таким образом, полученные результаты показывают, что в коаксиальном отражательном триоде с расходящимся пучком получена генерация электромагнитного излучения волны TM_{01} .

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты работы

1. В результате исследования электродинамических систем отражательных триодов показано, что волна ТЕМ трансформируется в TM_{01} волну при выполнении резонансных условий в коаксиальном отражательном триоде. Показано, что критическая частота TE_{11} волны незначительно меняется при изменении формы внутреннего проводника.
2. Определены частотные зависимости коэффициентов передачи энергии волн S в электродинамических системах отражательных триодов. Получено, что $S \sim 0,8$ для волны TE_{11} и $S > 0,9$ для волны ТЕМ.
3. Показано, что асимметрию пучка в коаксиальном отражательном триоде с расходящимся пучком можно оценивать из сравнения расчетной и экспериментальной диаграмм направленности.
4. Проведено теоретическое исследование резонансного взаимодействия колебаний ВК с собственными модами электродинамической структуры коаксиального и планарно-коаксиального триодов. Определены условия на геометрию и местоположения катодов для эффективного взаимодействия электронного пучка с волнами ТЕМ и TE_{11} .
5. Проведено моделирование методом крупных частиц формирования ВК и возбуждения электромагнитных колебаний в отражательных триодах. Численно показано, что ток и частота излучения при ширине эмиссионной поверхности $h > 2d$ практически не зависят от h .
6. Экспериментально и численно показано, что в коаксиальном отражательном триоде со сходящимся пучком увеличение мощности пучка (\sim в 7 раз) при увеличении ширины катода (с 2 до 5,5 см) происходит при практически постоянном токе триода и частоте генерации. Экспериментально получена плотность мощности излучения до 10 Вт/см^2 на углу 30° и 3 Вт/см^2 на оси системы при длительности импульса 60 нс (на половинном уровне мощности) с частотой 3 ГГц.
7. Экспериментально подтверждена возможность одномодовой генерации электромагнитного излучения планарно-коаксиального триода с ВК. Максимальная мощность излучения в эксперименте получена при формировании двух пучков на уровне 100 МВт при длительности импульса излучения 60 нс при частоте генерации 3,1 ГГц.
8. Экспериментально подтверждена возможность одномодовой генерации электромагнитного излучения коаксиального отражательного триода с радиально расходящимся пучком. Экспериментально и численно получено, что мощность излучения зависит от местоположения пучка относительно отражателя и имеет экстремальную зависимость от ширины катода. Показано, что излучение коаксиального отражательного триода с расходящимся пучком происходит на TM_{01} волне. Максимальная мощность излучения получена в эксперименте 260-300 МВт на частоте 3 ГГц.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

01. В.П. Григорьев, А.Г. Жерлицын, Т.В. Коваль, Г.В. Мельников, А.Л. Марченко, Нгуен М. Туан. Исследование структуры полей и резонансных частот планарно-коаксиального отражательного триода // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319, № 2 :– С. 77-80.
02. А.Г. Жерлицын, Т.В. Коваль, Г.Г. Канаев, Т.М. Нгуен. Исследование генерации электромагнитного излучения в коаксиальном виркаторе с расходящимся пучком // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. – №2. – С. 81-85.
03. Г.В. Мельников, Т.В. Коваль, А.Л. Марченко, Н.М. Туан. Несимметричный коаксиальный отражательный триод с виртуальным катодом // Известия Вузов. Физика. – 2010. – Т.53. – №10/2. – С. 237–240.
04. Жерлицын А.Г., Канаев Г.Г., Коваль Т.В., Нгуен Т.М., Марченко А.Л. Исследование возбуждения электромагнитных колебаний в планарно-коаксиальном триоде с виртуальным катодом // Известия Вузов. Физика. – 2011. – Т.54. – № 11/2. – С. 209-214.
05. N.M. Tuan, T.V. Koval, G.V. Melnikov, and A.G. Zherlitsyn. The Research of the Coaxial Viricator with a Symmetric Converging Electron Beam // 16th International Symposium on High Current Electronics: Proceedings - Tomsk, September 19-24, 2010. - Tomsk: Publishing House of the IOA SB RAS, 2010. – pp. 497–500.
06. Nguyen Minh Tuan, Tamara V. Koval. Research of stationary conditions of an electron beam and virtual cathode formation in reflective triodes of various geometries // VI International Conference of students and young scientists «Prospects of Fundamental Sciences Development». Russia, Tomsk, April 20–23, 2010. ISBN 978-5-98298-626-9 – pp. 429–431.
07. A.L. Marchenko, T.V. Koval, and N.M. Tuan. The Coaxial Viricator with an Asymmetric Electron Beam // 16th International Symposium on High Current Electronics: Proceedings - Tomsk, September 19-24, 2010. - Tomsk: Publishing House of the IOA SB RAS, 2010. – pp. 494–496.
08. А.Г. Жерлицын, Т.В. Коваль, Г.Г. Канаев, Т.М. Нгуен. Исследование электродинамических и излучательных характеристик коаксиальных триодов с виртуальным катодом // Вестник науки Сибири, Электронный журнал ТПУ, Том 4, № 3, 2012 - С. 209-214
09. Nguyen Minh Tuan, Tamara V. Koval. The modeling of electron beam stationary condition in the diode and drift space, сборник докладов IV научно-практической конференции иностранных студентов, магистрантов и аспирантов НИ ТПУ «Коммуникация иностранных студентов, магистрантов и аспирантов, в учебно-профессиональной и научной сферах».– Томск, 12-16 апреля 2010 года. Томск: Издательство ТПУ, 2010 – С. 85–88.
10. Нгуен Минь Туан, Г.В. Мельников. Экспериментальное исследование планарно-коаксиальной отражательной системы с виртуальным катодом // Сборник трудов IX Всероссийской научно-практической конференции

студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии.». Томск, 11 - 13 мая 2011 г., ч.1. Томск: Изд-во СПб Графикс – С. 210–211.

11. Нгуен Минь Туан, Т.В. Коваль, Иенс Флам, А.В. Малигин, Моделирование компонентов 28ГГц/15КВт технологических гиротронов в CST Microwave Studio // Сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» – Томск. 25 - 27 апреля 2012, С. 588-592.
12. Нгуен Минь Туан, Т.В. Коваль. Двухмерное стационарное состояние электронного пучка в диоде // Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии.». г. Томск, 3 - 5 марта 2010 г.– Томск: Изд-во СПб Графикс– С. 85–86.