



ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Серия 1
ЭЛЕКТРОНИКА СВЧ

Выпуск 17 (1490)

И. Г. Артюх, А. Н. Сандалов, А. С. Сулакшин,
Г. П. Фоменко, Ю. Г. Штейн

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ
СВЧ-УСТРОЙСТВА
СВЕРХБОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

1989

В аналитическом тематическом обзоре представлены экспериментальные результаты по генерации мощного СВЧ-излучения, получаемого на релятивистских электронных потоках.

На основе теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в СССР и за рубежом в 1970—1988 гг, представлена информация о генерации СВЧ-импульсов сверхбольшой мощности, получаемой на устройствах с продольным взаимодействием (релятивистских ЛОВ, ЛБВ, клистро-нах, виркаторах) и релятивистском магнетроне. Анализируются возможности релятивистских СВЧ-приборов (релятивистского клистрона, гирокон, магникон, клистрода), работающих на традиционных термоэмиссионных ЭОС, и вопросы использования их в системах СВЧ-питания нового поколения ускорительной техники для исследований по физике высоких энергий.

Обзор представляет интерес для разработчиков СВЧ-приборов и научных сотрудников, занимающихся исследованиями в области СВЧ-электроники и ускорительной техники.

Ключевые слова: электровакуумные приборы, когерентное излучение, сильнотоочные ускорители, генераторы, усилители, релятивистский клистрон, виркатор, релятивистский магнетрон, релятивистские ЛОВ, ЛБВ, клистрод, магникон, гирокон.

ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Серия I. Электроника СВЧ

ВЫПУСК I7(I490)

И.Г.Артюх, А.Н.Сандалов, А.С.Сулакшин,
Г.П.Фоменко, Ю.Г.Штейн

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ СВЧ-УСТРОЙСТВА СВЕРХБОЛЬНОЙ
МОЩНОСТИ

(по данным отечественной и зарубежной печати за 1970-1988 гг.)

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
1. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА	4
2. РЕЛЯТИВИСТСКИЕ СВЧ-ГЕНЕРАТОРЫ С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ	9
2.1. Триоды с виртуальным катодом	9
2.2. Виркаторы с пролетными электронами	12
2.3. Виркаторы без внешнего магнитного поля	13
2.4. Виркаторы с внешним магнитным полем	15
2.5. Виркаторы с синхронизацией фазы и частоты от внешнего гене- ратора	16
3. РЕЛЯТИВИСТСКИЙ МАГНЕТРОН	17
3.1. Релятивистские аналоги классического магнетрона	18
3.2. Особенности работы релятивистского магнетрона в микро- кундном диапазоне длительностей импульса напряжения	31
3.3. Релятивистский магнетрон с внешней инжекцией электронного пучка	32
3.4. Обращенные релятивистские магнетроны	34
4. РЕЛЯТИВИСТСКИЕ УСТРОЙСТВА КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН	37
4.1. Релятивистские устройства с диэлектрическими замедляющими системами	37
4.2. Мощные СВЧ-приборы с сверхразмерными электродинамическими отростками	40
5. РЕЛЯТИВИСТСКИЕ СВЧ-ПРИБОРЫ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ	44
5.1. Гирокон и магнотрон	44
5.2. Клистрон	49
5.3. Релятивистские многорезонаторные клистроны	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	58
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	59

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых методов генерации и усиления когерентного СВЧ-излучения всегда сопровождается интенсивным развитием смежных областей науки и техники. Быстрая техническая реализация определяет темпы научно-технического прогресса, стимулирует поиск механизмов генерации, создание, совершенствование и использование СВЧ-приборов в научных и технических целях. В качестве примеров можно привести историю возникновения СВЧ-приборов, традиционных лазеров, гиротронов, лазеров на свободных электронах и т.д.

Повышение мощности и укорочение рабочей длины волны СВЧ-излучения стимулировало разработку и реализацию новых способов ускорения заряженных частиц, привело к появлению компактных ускорителей (типа разрезного микротрона), позволило повысить, в свою очередь, энергию частиц, увеличить ток электронного пучка, поднять темп ускорения в уже действующих ускорителях, разработать мощные источники когерентного излучения – лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) [1,2].

Для создания новых ускорителей заряженных частиц на энергию 0,5+2 ТэВ требуется дальнейшее повышение мощности СВЧ-устройств до единиц гига watt в импульсном и 500 МВт в непрерывном режиме, которые к настоящему времени пока не реализованы. Повышать мощность СВЧ-приборов можно путем увеличения либо ускоряющего напряжения, либо тока электронного пучка, либо обоих параметров сразу. Это позволяет использовать все многообразие физических принципов когерентного излучения заряженных частиц. Об этом, в частности, говорит опыт развития релятивистской СВЧ-электроники, где на первом этапе анализировались возможности создания устройств на индуцированном, дифракционном, магнитотормозном, синхротронном излучении, вынужденном когерентном излучении и др.

Разработка новых источников для генерации когерентного излучения на релятивистских электронных потоках – релятивистские ЛОВ, ЛБВ, магнетрон, мазер на циклотронном резонансе (МЦР), многоволновые генераторы и др. – обеспечила значительный отрыв по уровню генерируемой выходной мощности от традиционной СВЧ-электроники, показав принципиальную возможность достижения требуемых для новых ускорителей уровней мощности [3].

Параллельно с развитием новых способов генерации когерентного излучения, начиная с 60-х годов, происходило совершенствование приборов, основанных на традиционных механизмах генерации и усиления мощного СВЧ-излучения. Оно шло в направлении совершенствования традиционных конструкций приборов и поиска новых решений, позволяющих разрабатывать новые классы устройств. Теоретический анализ физических процессов в мощных СВЧ-приборах затруднен

их сильной нелинейностью и многопараметричностью, что требует привлечения мощных ЭВМ. По мере развития возможностей вычислительной техники совершенствовались теории и модели, применяемые для анализа механизмов взаимодействия электронного потока и электромагнитного поля. В настоящее время экспериментальный успех в создании приборов во многом определяется тщательностью их теоретической проработки.

Среди мощных приборов традиционного типа наиболее распространенными являются ¹многорезонаторный клистрон и ЛБВ. К основным достоинствам ЛБВ следует отнести возможность усиления когерентного излучения в широкой полосе частот, а преимущество клистронов — получение значительного уровня мощности при высоком КПД. Следует заметить, что в случае применения интенсивных электронных потоков конфигурации ЛБВ и многорезонаторного клистрона становятся близкими: замедляющие системы ЛБВ содержат уже цепочки связанных резонаторов, и в этом случае ЛБВ теряет свое основное преимущество — широкополосность, а многорезонаторные клистроны при использовании распределенных входных и выходных устройств реализуют значительную полосу усиливаемых частот при сохранении высокого значения КПД.

Поиск новых способов генерации высокоэффективного излучения привел к появлению новых устройств, работающих в длинноволновой области спектра (более 1 м), — гироконов, магниконов [4,5] и клистронов [6,7], которые, обладая значительным уровнем выходной мощности и высоким КПД, могут использоваться в качестве СВЧ-питания современных ускорителей. Выходная мощность гироконов в настоящее время составляет единицы мегаватт в непрерывном режиме на длине волны около 1,5 м при КПД 75 %. Однако попытки продвинуться в коротковолновую область к успеху не привели, хотя и получена мощность в десятки мегаватт в сантиметровом диапазоне длин волн. Применение гироконов в других областях, кроме ускорительной техники, ограничено их узкополосностью, но при доработке и совершенствовании они могут найти широкое применение в СВЧ-энергетике. Гироконы, как и магниконы, разработаны в Новосибирске в ИЯФ СО АН СССР [4,5], в настоящее время разрабатываются в США [8,9].

Клистроны — гибрид клистрона и СВЧ-тетрода, предложенные и созданные [6,7] в США, обладают значительным уровнем мощности и высоким КПД в длинноволновом диапазоне длин волн. Наиболее мощный клистрод на длине волны 67 см имеет мощность 1 МВт в непрерывном режиме при КПД 75 % [7]. Усиление клистронов, магниконов и гироконов не более 30 дБ. Однако клистроны в отличие от гироконов и магниконов обладают достаточной широкополосностью. Создан телевизионный киловаттный клистрод, работающий в диапазоне 600-805 МГц [7].

При переходе в коротковолновую часть СВЧ-диапазона выходные параметры традиционных устройств значительно ухудшаются в связи с тем, что размеры систем становятся сравнимыми с длиной волны излучения. Выход из этого положения был найден в 50-60-е годы, когда начались теоретические и экспериментальные исследования приборов квантовой электроники. Исследования индуцированного излучения релятивистских электронов послужили основой приборов на классическом индуцированном излучении свободных электронов — электронных мазеров [10]. Наибольшее распространение получил слабoreлятивистский МЛР, и особенно одна из его разновидностей — гиротрон. Высокоэффективный гиро-

трон содержит адиабатическую термоэмиссионную магнетронную пушку и слабоне-регулярный волновод. В гиротроне происходит взаимодействие потока возбужденных слабoreлятивистских электронных осцилляторов с одной из собственных волн волновода вблизи частоты отсечки. Развитие гиротронов в 70-е годы горьковской школой акад. А.В.Гапонова [11] привело к созданию источников миллиметрового и субмиллиметрового излучения с мощностью, на 2-3 порядка превосходящей другие приборы, работающие в коротковолновой части СВЧ-диапазона. В миллиметровом диапазоне длин волн мощности гиротронов приближаются к единицам мегаватт при длительности импульса до 1 с [12]. В настоящее время гиротроны стали приборами СВЧ-энергетики рекордными по совокупности многих параметров и успешно применяются при решении задач термоядерного синтеза [13].

Учитывая многообразие механизмов генерации мощного СВЧ-излучения, мы включили в настоящий обзор только устройства на продольном взаимодействии (релятивистские ЛОВ, ЛБВ, клистрон, виркатор) и релятивистский магнетрон, которые не нашли достаточно полного отражения в обзорной литературе.

Для релятивистских СВЧ-приборов (релятивистского клистрона, гирокона, магникона, клистрода), работающих на традиционных ЭОС, анализируются возможности использования в системах СВЧ-питания нового поколения ускорительной техники с целью исследований физики высоких энергий.

Введение, разделы I и 5 написаны И.Г.Артюхом и А.Н.Сандаловым, раздел 2 - Г.П.Осменко, раздел 3 - А.С.Сулакшиным, раздел 4 - Ю.Г.Штейном.

I. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА

Развитие идей релятивистской электроники началось в основном с работы В.Л.Гинзбурга (1947 г.) [14], где была показана возможность получения когерентных колебаний коротковолнового диапазона длин волн с помощью потоков прямолинейно движущихся релятивистских электронов и потоков релятивистских доплеровских осцилляторов.

Первый этап развития релятивистской электроники приходится на 50-60-е годы - период бурного развития традиционных лазеров. Теоретически и экспериментально изучались различные способы генерации колебаний в неосвоенных тогда миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн с помощью ускорителей-группирователей, создающих сгустки электронов, и излучателей различного типа. В качестве ускорителей-группирователей применялись линейные ускорители, реоботроны и микротроны. Излучение сгустков наблюдалось в магнитном модуляторе и гармонотроне, в черенковском излучателе и генераторе переходного излучения, в открытых резонаторах и специальных волноводах. Были получены когерентные колебания миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с мощностью излучения до нескольких ватт [15]. Однако в связи с большой громоздкостью устройств и малой их эффективностью релятивистские способы генерации СВЧ-колебаний в конце 60-х годов постепенно утратили практическое значение и уступили место другим способам получения коротковолнового излучения.

Низкая эффективность релятивистских генераторов связывалась с малыми токами электронных пучков (единицы и десятки миллиампер). Малая мощность излучения не позволила получить сколько-нибудь заметного торможения потока СВЧ-полем. В частности, в упомянутых устройствах прежде всего не реализовывался принцип индуцированного излучения электронов в электромагнитном поле.

Качественно новый этап в развитии релятивистской СВЧ-электроники намечился в 70-е годы, после начала исследований по излучению сильноточных электронных потоков, на специально созданных сильноточных линейных ускорителях и по излучению электронных сгустков в накопительных кольцах и традиционных линейных электронных ускорителях [2]. В течение последнего десятилетия реализовано много экспериментальных СВЧ-устройств релятивистской сильноточной электроники, лазеров и мазеров на свободных электронах [1,2].

В релятивистской сильноточной электронике обычно имеет дело с интенсивными электронными потоками, формируемыми электронными пушками сильноточных ускорителей с холодными катодами со взрывной эмиссией и направляемыми сильным продольным магнитным полем. Токи электронных пучков достигают значений 1-100 МА, а ускоряющие напряжения - 50 МВ [16]. Наиболее мощной установкой такого типа является линейный индукционный ускоритель АТА (США), работающий при ускоряющем напряжении 50 МВ, токе 10 кА, длительности импульса 70 нс и частоте повторения 10 Гц.

На сильноточных электронных ускорителях были исследованы многие релятивистские аналоги одномодовых электронных приборов большой мощности и релятивистских генераторов нового типа. С их помощью были получены значительные мощности СВЧ-излучения в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн от нескольких десятков мегаватт до десятка гигаватт, правда, пока в режиме коротких одиночных или редко повторяющихся импульсов. Обнаружились и значительные трудности в реализации энергетических возможностей сильноточных ускорителей. В то время как импульсная энергия электронного потока порядка мегаджоулей, импульсная энергия СВЧ-излучения находится на уровне сотен джоулей. Малый КПД обуславливается СВЧ-пробоями, паразитной генерацией и нелинейными эффектами в потоке. Затруднено и практическое использование получаемого излучения, что связано в основном с моноимпульсным режимом работы, качественным составом спектра выходного излучения и т.д. Работы в этом направлении интенсивно развиваются, и можно надеяться, что в ближайшее десятилетие основные трудности на пути практической реализации получаемого СВЧ-излучения будут преодолены. Однако и сейчас потребность, например, в области химии (при исследовании сложных химических реакций) можно обеспечить уже реализованным уровнем мощности коротких импульсов СВЧ-излучения.

Мощное узконаправленное некогерентное синхротронное излучение релятивистских электронов, движущихся в накопительных кольцах, естественным образом реализуется в световом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах длин волн. Его мощность достигает нескольких десятков и сотен киловатт, что позволяет использовать это некогерентное излучение в различных областях науки и техники [17]. Однако для решения ряда практически важных задач необходимо когерентное синхротронное излучение, которое и было получено в ЛСЭ в световом и ИК-диапазонах.

Мощность излучения потока составляет сотни киловатт и единицы мегаватт, что несколько меньше мощности современных лазеров. Это обусловлено ограниченной величиной тока пучка накопителей и относительно малым КПД ЛСЭ. Одним из преимуществ ЛСЭ является перестройка частоты излучения при изменении энергии ускорителя в широких пределах. В последнее время перспективы ЛСЭ значительно расширились и полагаются, что на их основе могут быть созданы мощные источники высокоэффективного излучения с плавной перестройкой частоты от СВЧ до ультрафиолетовой области спектра. Их создание подкрепляется, в частности, потребностями лазерохимии, физики полупроводников, где требуются высокоэффективные источники когерентного излучения с перестройкой частоты практически во всем ИК-диапазоне и интенсивностью от 1 до 100 МВт/см². В настоящее время в понятие ЛСЭ включают более широкий класс источников когерентного излучения, в которых реализуется индуцированное излучение релятивистских свободных электронов любой природы, в том числе черенковское, переходное, тормозное, магнитотормозное и т.п. [2].

Конечно, говорить о высокой эффективности ЛСЭ можно только в сравнении с традиционными лазерами, которые имеют КПД единицы процентов, и ни в коей мере в сравнении с традиционными СВЧ-приборами, КПД которых близок к 90 % в нагрузку.

Достигнутые к настоящему времени уровни мощности когерентного излучения на генераторах и усилителях различного типа приведены на рис.1.1 [1,2]. Как уже говорилось, в длинноволновой области спектра электромагнитных волн в основном разрабатываются традиционные СВЧ-приборы. Миллиметровая и субмиллиметровая области осваиваются гиротронами и релятивистскими устройствами, а дальнейшее продвижение по шкале длин волн происходит за счет ЛСЭ. Для сравнения на рис.1.1 даны уровни мощности, освоенные традиционными лазерами.

Если развернуть затрихованные области на рис.1.1, то возможности традиционных приборов в частотном диапазоне тоже не одинаковы (рис.1.2 и 1.3). Видно, что уровень импульсной мощности в области 10+100 ГГц

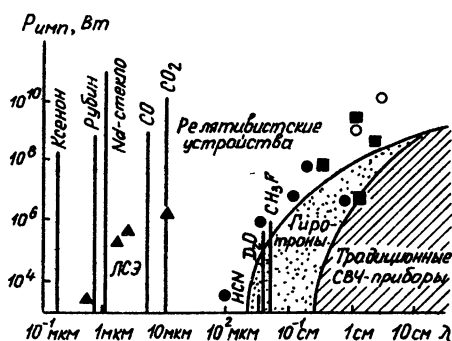


Рис.1.1. Зависимости импульсной мощности генераторов и усилителей различного типа от длины волны [1,2]:
■ — ЛДУ, ▲ — ЛУ, эксперименты на ускорителях прямого действия, проведенные в СССР (○) и других странах (●)

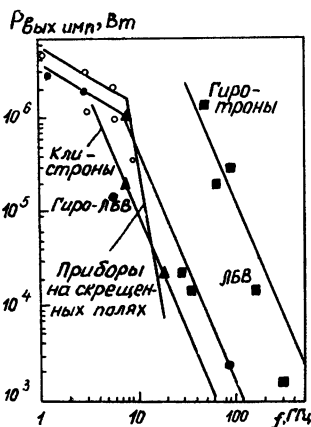


Рис.1.2. Уровни импульсной мощности традиционных СВЧ-приборов и гиротронов:
○ — приборы магнетронного типа; ● — ЛВВ; ▲ — клистроны; ■ — гиротроны [18]

(см. рис.1.2) падает и при частотах более 30 ГГц практически работают только гиротроны. Наибольшее продвижение по частоте из традиционных приборов имеют ЛБВ. Из приборов, работающих в непрерывном режиме (см. рис.1.3), в области 10+150 ГГц работают практически только ЛБВ, ЛОВ и гиротроны. В области частот 0,5+10 ГГц наиболее мощными импульсными приборами являются многорезонаторные клистроны (рис.1.4), а в области 30+300 ГГц — гироклистроны (рис.1.5), область 10+30 ГГц охватывается ЛБВ и релятивистскими устройствами. Релятивистские СВЧ-устройства и ЛСЭ создаются и работают главным образом на линейных ускорителях (ЛУ), ускорителях прямого действия, линейных индукционных ускорителях (ЛИУ), электростатических ускорителях, накопителях и микротронах.

Трудности развития релятивистской СВЧ-электроники и ЛСЭ заключены в основном в качестве формирования электронных потоков. Если в традиционной СВЧ-электронике использование термоэмиссионных катодов с высокой плотностью тока (для импульсных приборов до 10 А/см² и непрерывных до 2 А/см²) позволяет формировать потоки электронов с примерно равномерным распределением плотности по сечению потока, то использование холодных катодов со взрывной эмиссией (10⁶ А/см²) значительно затрудняет получение импульсов тока прямоугольной формы. Фронты нарастания и спада импульса значительны, а "полочка" неравномерна.

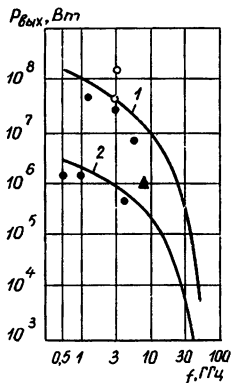


Рис.1.4. Технологические пределы для многорезонаторных клистронов импульсного ($\tau_u = 10$ мкс) (1) и непрерывного (2) режимов работы

● — клистроны фирмы Thomson-CSF;
○ — клистроны SLAC; ▲ — клистрон X3030

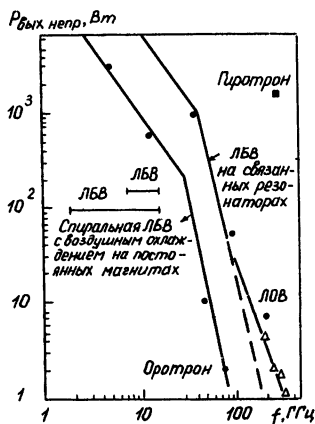


Рис.1.3. Уровни непрерывной мощности традиционных СВЧ-приборов и гиротронов [18]

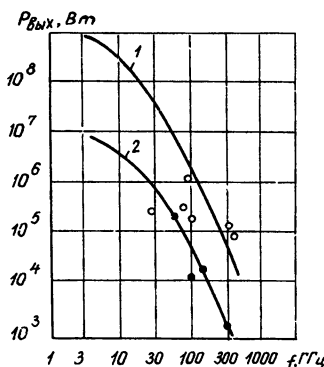


Рис.1.5. Технологические пределы для импульсных ($\tau_u = 10$ мкс) (1) и непрерывных (2) гироклистронов

● — непрерывный режим; ○ — импульсный режим

Применение специальных мер в системах формирования, например эмиттансных фильтров и дополнительных магнитных систем, позволяет улучшить качество формирования электронного потока в сильноточных ускорителях, но приблизиться по параметрам к термоэмиссионным пушкам пока не удалось. В то же время и термоэмиссионные катоды с указанными выше плотностями тока не позволяют в полной мере реализовать возможности ускорительных устройств для создания ЛСЭ, поскольку для их реализации необходимо на несколько порядков поднять ток ускорителя. Поэтому в настоящее время разрабатываются новые катоды для получения повышенных плотностей тока. Разрабатываются и уже используются лазерные фотокатоды на CS_3Sb , $GaAs$ и Lu_6B . Максимальная достигнутая в экспериментах плотность тока на фотокатодах из CS_3Sb составила 600 A/cm^2 [2]. Заметим, что первые же эксперименты на лазерном фотокатодe стимулировали разработки устройства для генерации мощного СВЧ-излучения, названного лазертроном [2].

Возможным решением данной проблемы может быть переход к пространственно развитым электронным потокам. Однако их реализация сопряжена с большими энергетическими затратами, которые, главным образом, идут на создание фокусирующих магнитных полей. Тем не менее при ограниченных энергиях частиц пространственно развитых потоков возможно продвижение в область значительных уровней мощности когерентного излучения в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн.

Для формирования и транспортировки релятивистских килоамперных электронных потоков необходимы напряженности магнитных полей более $20\text{--}30 \text{ кГс}$. С этой целью применяются электромагниты, что приводит к существенным энергетическим затратам. Экспериментальные исследования по использованию постоянных магнитов из редкоземельных элементов для фокусировки таких электронных пучков дали обнадеживающие результаты. Кроме этого, разработаны новые магнитные материалы на основе неодима - железа - бора, у которых получена магнитная энергия $45 \text{ МГс}\cdot\text{Э}$ с перспективой получения $60 \text{ МГс}\cdot\text{Э}$ и которые позволяют приблизить решение задачи.

Сильноточные электронные ускорители, формирующие килоамперные электронные пучки, весьма громоздки, и одной из актуальных задач является уменьшение их габаритов при сохранении основных параметров пучка. В настоящее время начата разработка (главным образом за рубежом) компактных линейных индукционных ускорителей, обеспечивающих фронт нарастания импульса, равный единицам наносекунд, на основе новых ферромагнитных материалов с повышенной электрической прочностью.

Таким образом, развитие и совершенствование способов генерации и усиления когерентного излучения тесно связано с успехами в развитии физики твердого тела, материаловедения и других областей науки и техники.

Остановимся теперь более подробно на достижениях в области генерации и усиления мощных электромагнитных колебаний интенсивными электронными потоками на отдельных приборах.

Релятивистская высокочастотная электроника больших мощностей возникла в результате значительных успехов в развитии импульсной сильноточной электроники: высоковольтной техники, техники формирования и транспортировки интенсивных электронных пучков. Однако в полной мере использовать достижения сильноточной электроники не удалось, так как применялись методы генерации, не отличающиеся от методов классической СВЧ-электроники. Действительно, эффективность приборов пролетного типа (ЛОВ, ЛЕВ, МПР) резко снижается при приближении тока к предельному для данных генерирующих систем из-за влияния пространственного заряда пучка. Что же касается приборов магнетронного типа, то хотя отрицательное влияние на их работу пространственного заряда значительно слабее, тем не менее, коэффициент использования мощности источника также невелик из-за того, что не удается согласовать волновое сопротивление генератора и формирующей линии низковольтного источника питания.

Поиски путей преодоления этих трудностей привели к созданию нового класса принципиально сильноточных приборов, которые успешно работают только при токах выше предельных, когда возникает поток электронов, отраженных в сторону катода, и образуется виртуальный катод (ВК). Очевидно, возможны различные типы СВЧ-приборов с ВК, которые получили название виркаторов. Впервые экспериментально осуществленным виркатором, по-видимому, является МПР с виртуальным катодом [21].

Все существующие в настоящее время виркаторы могут быть условно разделены на две группы: приборы с полным отражением электронов от виртуального катода в стационарном состоянии и частичным, когда одновременно существует поток отраженных электронов и поток электронов, пролетающих в сторону коллектора. К первой группе относятся так называемые триоды с ВК, ко второй — многочисленные их модификации, которые, собственно, и имеют общее название — виркатор.

2.1. Триоды с виртуальным катодом

Отражательные триоды были первыми генераторами излучения сантиметрового диапазона длин волн классической СВЧ-электроники [22]. Многочисленными исследованиями было показано, что генерация осуществляется благодаря осцилляторному движению электронов вокруг сетки-анода между катодом и отражателем на частоте осцилляций или кратной ей. Этот же принцип положен в основу и релятивистских триодов, в которых колебания электронов происходят между реальным и виртуальным катодом, выполняющим роль отражательного электрода.

На рис.2.1 схематически показано устройство триода с ВК. Высоковольтный планарный диод помещается в резонансную систему, размеры которой значительно больше размеров катода и сетки-анода и зазора между ними. Резонансная система одновременно служит вакуумным объемом электронного потока. Катод, представляющий собой металлический диск диаметром в несколько сантиметров, и резонансная система находятся под нулевым потенциалом. Анодом является натянутая на обод металлическая сетка с геометрической прозрачностью $0,5+0,9$. Генератор работает следующим образом.

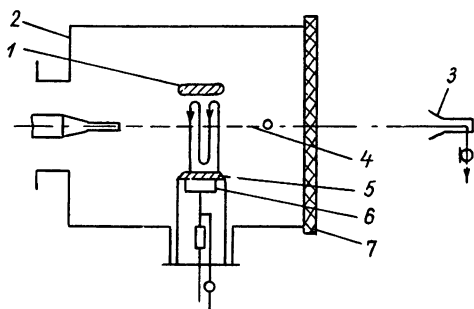


Рис.2.1. Схема триода с ВК:
1 - ВК; 2 - металлическая камера; 3 - приемная антенна; 4 - сетка-анод; 5 - катод; 6 - цилиндр Фарадея; 7 - окно для вывода излучения

тода. Таким образом формируется облако электронов, осциллирующих вокруг анода в потенциальной яме между реальным и виртуальным катодом. Часть электронов из-за конечной прозрачности сетки-анода непрерывно оседает на ней, а с катода эмитируются новые электроны в количестве, необходимом для выполнения "закона трех вторых" или его релятивистского аналога.

Эта система ангармонических электронных осцилляторов благодаря фазовой группировке, а затем селекции "неправильнофазных" электронов на катоде и стенках вакуумной камеры образует модулированный по фазе поток, который эффективно возбуждает высокочастотное поле в резонансной системе на частоте колебаний электронов или кратной ей. "Правильнофазные" электроны, теряя энергию, уменьшают амплитуду колебаний вокруг анода и постепенно оседают на сетке и таким путем выводятся из взаимодействия с высокочастотным полем. Электромагнитное излучение выводится из резонатора через вакуумно-плотное окно и излучающую антенну в свободное пространство.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями выяснены закономерности работы и параметры триодов с ВК в релятивистской области значений энергии (табл.2.1). Прежде всего следует отметить, что это генератор сантиметрового и дециметрового диапазона длин волн. Как видно из таблицы, эффективность его достигает 30 % в 10-см области, а мощность 10^9 Вт при использовании сравнительно скромных импульсных ускоряющих систем в качестве источников напряжения. Частота излучения определяется приложенным к промежутку катод - анод напряжением, причем характер этой зависимости при малых напряжениях такой же, как и обнаруженный еще в работе Баркгаузена и Курца в классическом отражательном триоде [22]. С учетом релятивистских поправок он может быть представлен в виде [23,27]:

$$f = \frac{c}{6d} \sqrt{\frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0 + 1}} F(\gamma_0) \quad , \quad (2.1)$$

где $\gamma_0 = 1 + \frac{eU}{m_0 c^2}$, U - напряжение, d - зазор катод - анод, c - скорость света, $F(\gamma_0)$ - функция, принимающая значения от 1 до 1,5 при изменении γ_0 от 1 до ∞ . Из этой формулы, в частности, следует, что изменением напряже-

После подачи на анод положительного потенциала напряжением $10^5 + 10^6$ В благодаря взрывной эмиссии с катода поток электронов ускоряется в промежутке катод - анод и выходит в пространство за анодом, где тормозится собственным кулоновским полем и отражается обратно к аноду, образуя ВК на расстоянии от анода, примерно равном расстоянию до реального катода. Отраженные электроны проникают сквозь сетку в область диода и вновь тормозятся у поверхности катода.

Отражательные триоды с виртуальным катодом

Место и год эксперимента	Ускоритель			СВЧ-излучение			
	Напряжение, МВ	Ток, кА	Длительность импульса, нс	Мощность, ГВт	Частота, ГГц	Длительность импульса, нс	КПД, %
Военно-морская лаборатория (Вашингтон, США), 1977 [23]	0,35	25	50	0,1	8+12	-	1,5
Лаборатория "Харри Даймонд" (Адельфи, США), 1977 [24]	1,0	20	14	1,0	7+13	10	2,0
НИИЯФ при ТПИ (Томск), 1979 [25]	0,45	25	50	1,4	2,1+6	45	12
То же, 1983 [26]	0,2	2,7	700	0,1	3,0	500	18
	0,3	6,0	400	0,5	3,2	260	27

ния генерируемая длина волны может перестраиваться в широких пределах без изменения геометрии диода и резонансной системы. Зависимость f от величины диодного промежутка d отличается от (2.1), вычисленной для идеального одномерного диода. Экспериментальную зависимость f от d можно аппроксимировать как $f \sim d^{-n}$, где $0 < n < 1$ [23], что может быть объяснено влиянием конечных поперечных размеров диода и электронного потока, влиянием собственного магнитного поля, неравномерным распределением плотности по поперечному сечению и другими эффектами. Изменяя форму эмиттирующей поверхности многоострийного катода [28], можно регулировать частоту в пределах ~ 60 МГц и мощность триодного генератора. Изменение генерируемой частоты на $10+15\%$ можно получить также при подаче в резонатор триода небольшой СВЧ-мощности от внешнего генератора на частоте, отличной от собственной частоты колебаний триода [29].

В то же время различными экспериментами показано [30], что изменение формы, размеров и добротности резонансной системы не приводит к изменению генерируемой частоты. Однако от величины добротности существенно зависит мощность излучения. Так, при замене металлической камеры камерой, покрытой поглощающим материалом, величина генерируемой мощности уменьшилась на 4 порядка. Теоретические исследования зависимости КПД генератора от добротности и прозрачности сетки-анода, с учетом нелинейного характера процесса генерации, показали, что оптимальная добротность составляет $-(50+100)$, а прозрачность сетки $\sim 0,8$. При этом КПД около 30% , что удовлетворительно согласуется с экспериментальными результатами [31]. Стартовые токи триода с ВК составляют $1+10$ кА и увеличиваются при уменьшении добротности [32]. На основе кинетической теории определены стартовые токи генератора с учетом энергетического разброса электронного потока. При напряжении $U = 150$ кВ, добротности ~ 50 и энергетическом разбросе $\sim 5\%$ стартовый ток равен $4+5$ кА.

Следует отметить, что все экспериментальные исследования проводились с резонансными системами, размеры которых были значительно больше генерируемых

длины волн ($3+8 \lambda$), чтобы исключить электрический пробой между анодом и камерой. Большие размеры резонансной системы были использованы для формирования узкой диаграммы направленности излучения [33] с помощью параболического зеркала диаметром 40 см и фокусным расстоянием 25 см, установленного внутри камеры, напротив окна вывода мощности так, чтобы ВК находился в фокусе. Это позволило уменьшить ширину диаграммы излучения на длине волны 10 см приблизительно в 4 раза (со 100 до 23°) на половинном уровне мощности, что значительно уже, чем при использовании рупорной антенны высотой 80 и диаметром 100 см.

Таким образом, триод с ВК является сверхмощным генератором СВЧ-излучения с перестройкой частоты в широком диапазоне. Простота конструкции, высокая эффективность, возможность работы на нескольких несущих частотах одновременно выгодно отличают его от других мощных генераторов. Следует особо отметить и такое преимущество, как отсутствие магнитного поля. Для создания последнего в других генераторах требуется дополнительная мощность, величина которой сравнима с мощностью питания самого источника тока.

2.2. Виркаторы с пролетными электронами

Виркаторы этого типа отличаются от триодов тем, что отрицательный потенциал подается на катод, а анод, дрейфовая камера и коллектор находятся под одним потенциалом, обычно потенциалом земли. На рис.2.2 показана принципиальная схема такого виркатора. Электроны ускоряются в промежутке катод – анод и через анодную фольгу или сетку, прозрачные для высокоэнергетических электронов, попадают в дрейфовое пространство. Если ток инжектируемых электронов выше предельного тока для данной геометрии [34], то часть электронов тормозится собственным полем потока и отражается в сторону анода, другая часть электронного потока продолжает свое движение, пока не достигнет коллектора или стенок камеры. Таким образом, в этом случае из области ВК в стационарном состоянии испускаются электроны и в прямом и в обратном направлениях. Отраженные электроны, как и в случае триода с ВК, могут образовать поток осциллирующих электронов. Положение ВК, так же как и степень деления тока на отраженный и проходящий через ВК, определяется величиной приложенного напряжения и геометрией диода и дрейфового пространства. При увеличении инжектируемого тока проходящий ток стремится к четверти предельного тока, а ВК приближается к аноду.

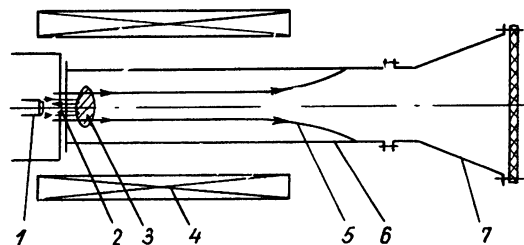


Рис.2.2. Схема виркатора:
1 - катод; 2 - анод; 3 - ВК; 4 - соленоид;
5 - электронный пучок; 6 - волновод; 7 - выходной рупор

Однако состояние потока с ВК является неустойчивым и переходит в колебательное состояние с частотой, близкой к плазменной частоте потока [35]. Возбуждение электромагнитных колебаний в виркаторе происходит из-за нелинейных колебаний осциллирующих электронов и колебаний ВК.

многочисленные модификации виркаторов различаются геометрией катодов, анодов, электродинамических систем, устройствами вывода СВЧ-излучения, а также наличием или отсутствием внешнего магнитного поля. В табл.2.2 приведены параметры экспериментальных образцов виркаторов различных типов.

Таблица 2.2

Виркаторы с пролетными электронами

Место и год эксперимента	Ускоритель			СВЧ-излучение				
	Напряжение, МВ	Ток, кА	Длительность импульса, нс	Магнитное поле, кГс	Мощность, ГВт	Частота, ГГц	Длительность импульса, нс	КПД, %
НИИЯФ при ТПИ (Томск), 1975 [21]	0,9	30	35	0,9	1,5±2,0	3,1	30	7,5
Науч.-исслед. политехн.школа (Франция), 1978 [44]	0,35	220	-	60	I	9+14	-	1,3
Нац.лаб. Лоуренса (Ливермор, США), 1985 [35]	0,45	38	80	0	0,25	7,25+7,75	50	1,5
Нац.лаб. (Лос-Аламос, США), 1985 [37]	1,2÷3	75+90	60	0	0,5	17	20	0,5
"Физикс интернешинал" (Сан-Леандро, США), 1985 [39]	I	100	60	0	I	8+12	-	I
То же, 1986 [40]	0,9	70	60	0	0,35	8+12	30	0,6
НИИЯФ при ТПИ (Томск), 1986 [45]	0,8	35,7	70	16	0,2	15	70	0,5
Нац.лаб. (Лос-Аламос, США), 1987 [46]	1,9	35	70	9,3	1,4	3,9	40	2
Нац.лаб. Лоуренса (Ливермор, США), 1987 [38]	1,5	80	80	0	4,0	6,5	40	3,3
НИИЯФ при ТПИ (Томск), 1988 [48]	1,2	20	35	6,0	1,5±2,0	5,5	30	6+8

2.3. Виркаторы без внешнего магнитного поля

Анализ работы виркаторов начнем с одной из наиболее простых схем без внешнего магнитного поля, предложенной Национальной лабораторией в Лос-Аламосе [36,37] в США. В качестве катодов использовались стержни из нержавеющей стали радиусом 3,8 и 2,8 см с нарезкой по торцевой поверхности для более равномерной эмиссии электронов.

Анодом служила прозрачная для электронов алюминиевая фольга или металлическая сетка с прозрачностью 84 и 60 %. Поток электронов из диода через анод попадает в трубу дрейфа диаметром 8,5 см и длиной 8,5 м. При этом часть

электронов, совершая колебания между реальным и виртуальным катодами, оседает в аноде, другая часть, проникающая за виртуальный катод, попадает на стенки трубы дрейфа. Генерируемое СВЧ-излучение распространяется по трубе дрейфа в калориметр, установленный в конце трубы. Амплитуда и частота излучения регистрируются с помощью расположенных в трубе электрических зондов. Излучение происходило в широкой полосе частот 6,25+7,75 ГГц с катодом радиусом 3,8 см и в полосе 7,25+8,75 ГГц с катодом радиусом 2,8 см при мощности 150+250 МВт в том и другом случае. Причем частота излучения увеличивается от начала к концу СВЧ-импульса. В виркаторе при напряжении 1,8 МВ на диоде с зазором 2 см в начале импульса генерация происходила на частоте 6,5 ГГц, а в конце на частоте 8 ГГц. Максимум мощности излучения 4 ГВт был на частоте 6,5 ГГц в полосе 0,5 ГГц на моде TM_{01} [38].

Более детально этот вопрос исследован в другом виркаторе без внешнего магнитного поля, предложенном сотрудниками фирмы "Физикс интернешнэл" в США [39,40], который отличается тем, что СВЧ-излучение выводится в направлении, перпендикулярном движению электронного потока. Электроны с катода радиусом 2,54 см ускоряются напряжением 1 МВ в промежутке анод - катод 0,7+1,3 см, через анодную фольгу попадают сквозь широкую стенку в прямоугольный волновод 12,7 x 6,4 см². Таким образом, ВК образуется в прямоугольном волноводе, а электроны осциллируют поперек волновода. СВЧ-колебания ТЕ-типа направляются вдоль волновода длиной 3,5 м в безэховую камеру для регистрации. СВЧ-импульс возникает в момент, когда ток диода достигает определенной величины, равной току, необходимому для пинчевания диода (т.е. сжатия пучка в диоде собственным магнитным полем [41]), $I_{ск} \approx 60$ кА. Вольт-амперная диаграмма виркатора показывает, что излучение начинается, когда ток I_k оказывается равным току Чайльда-Лэнгмюра диода, и заканчивается, когда полностью завершается процесс пинчевания диода, т.е. когда ток достигает величины парашотенциального тока [41]. Таким образом, виркаторы без внешнего магнитного поля генерируют только в состоянии пинча, поэтому наложение магнитного поля такой величины, которая препятствует сжатию пучка, должно нарушать режим генерации. Действительно, экспериментально показано, что при магнитном поле более 1 кГс почти полностью прекращается излучение [40], что хорошо согласуется с расчетными данными.

Виркаторы этого типа имеют довольно широкий спектр излучения (20+30 %) и эффективность несколько процентов. Для того чтобы улучшить эти параметры, сотрудники фирмы "Физикс интернешнэл" в том же самом виркаторе установили цилиндрический резонатор так, что анод диода являлся его торцевой стенкой [42]. Виртуальный катод образуется внутри резонатора, а СВЧ-излучение выводится в прямоугольный волновод через азимутальную щель в боковой поверхности резонатора. Возбуждение резонатора происходило лишь на частотах, соответствующих собственным модам резонатора. Изменением длины резонатора можно настроиться на ту или иную моду. В результате ширина полосы генерируемых частот уменьшилась в 5 раз (с 1 до 0,2 ГГц), а эффективность возросла в 1,5 раза.

Этой же группой авторов была разработана другая конструкция виркатора (названная ими "Виркатор II") для генерирования низкочастотного излучения от 0,74 до 5,75 ГГц мощностью 200+500 МВт при длительности импульса 100+400 нс

[43]. Наибольшая мощность излучения была достигнута при возбуждении моды TM_{012} резонатора на частоте 1,3 ГГц. Ширина полосы при этом составила 20 МГц и была в 3 раза уже, чем в случае виркатора без резонатора.

2.4. Виркаторы с внешним магнитным полем

В виркаторах без магнитного поля генерация СВЧ-колебаний происходит одновременно как за счет колебаний электронов вокруг анода, так и за счет колебаний ВК. Полоса генерируемых частот зависит от соотношения частот этих колебаний и обычно довольно велика. Применение магнитного поля позволяет не только эффективно удерживать электронный пучок [44], но и дает возможность изменять эти частоты, уменьшать число осциллирующих электронов или усиливать генерацию колебаниями виртуального катода.

В НИИЯФ (Томск) при ТПИ предложена конструкция виркатора с магнитоизолированным диодом ($r_k = 1$ см, $r_a = 1,5$ см), инжектирующего трубчатый пучок электронов (энергия 0,8 МэВ, ток 36 кА) в трубу радиусом 4 и длиной 40 см [45]. Генерируемое СВЧ-излучение выводится через азимутальную щель в боковой поверхности трубы в области виртуального катода. При магнитном поле более 8 кГс возбуждаются электромагнитные колебания на частотах около 3 и 10 ГГц, мощность которых на выходе передающей антенны составляла приблизительно 10^5 и 10^8 Вт соответственно. Анализ показывает, что длинноволновое излучение возбуждается колебаниями электронов, отраженных из волновода в диод, а коротковолновое излучение генерируется колебаниями виртуального катода. Генерация низкочастотных колебаний могла быть значительно ослаблена установкой диафрагмы на входе волновода, перехватывающей отраженные электроны.

Эту же цель преследовали и авторы другого виркатора, названного ими "редитроном" (Нац.лаб. в Лос-Аламосе, США) [46]. Импульс напряжения до 1,9 МВ длительностью 70 нс подавался на диод с трубчатым катодом радиусом 3 см и графитовым анодом с кольцевой щелью, радиус которой равен радиусу катода, а ширина 0,5 см. Пучок электронов с током до 48 кА через щель в аноде проходил в волновод радиусом 9 и длиной 125 см, который заканчивался конической антенной. Диод и примыкающая к нему область волновода длиной 16 см находятся в магнитном поле до 30 кГс. При увеличении магнитного поля B_z от 0 до 5 кГс мощность СВЧ-излучения быстро нарастала, а затем медленно спадала и при $B_z = 20$ кГс равнялась 0,5 от максимального уровня. Измерения, проведенные при $B_z = 9,3$ кГс, показали, что мощность излучения равняется $\sim 1,4$ ГВт на частоте (3,9±0,4) ГГц. Математическое моделирование на ЭМ подтверждает, что в этом виркаторе основная часть отраженных электронов перехватывается анодом и генерация СВЧ-излучения происходит из-за колебаний виртуального катода. В последующих модификациях редитрона удалось уменьшить полосу излучаемых частот до 1 % и существенно увеличить эффективность [47].

Другим типом виркатора, предложенным в НИИЯФ при ТПИ, является генератор на циклотронном резонансе [21, 48]. На рис. 2.2 схематически показано устройство этого генератора. Высоковольтный импульс 0,9±1,2 МВ длительностью 60 нс подается на катод планарного диода: радиус катода 1 и 2 см, зазор

катод - анод - 2 см, анод - титановая фольга (50 мкм) или сетка. Так как ток диода (20 кА) значительно выше предельного тока трубы дрейфа радиусом 4,6 см ($I_n = 9$ кА при $U = 1,2$ МВ и $I_n = 6$ кА при $U = 0,9$ МВ), то виртуальный катод образуется при всех значениях напряжения и радиуса катода. Импульсное магнитное поле в области диода и на части трубы дрейфа создавалось соленоидом. Использовался соленоид длиной 80 см [21] и секционированный, изменяемой длины [48]. Величина мощности СВЧ-излучения во всех случаях имела характерную резонансную зависимость от напряженности магнитного поля. Генерируемая частота определялась величиной приложенного напряжения и радиусом катода: $U = 0,9$ МВ, $r_k = 2$ см, $f = (3,100 \pm 0,1)$ ГГц; $U = 1,2$ МВ, $r_k = 2$ см, $f = (2,85 \pm 0,1)$ ГГц и $U = 1,2$ МВ, $r_k = 1$ см, $f = (5,5 \pm 0,5)$ ГГц. Указанные полосы частот ограничены точностью измерений, спектр же генерируемых частот, по-видимому, значительно уже. Мощность излучения на всех частотах $\sim 1,5 \pm 2,0$ ГВт при оптимальных значениях магнитного поля.

Измерение амплитуды СВЧ-колебаний магнитными зондами, установленными вдоль волновода, показывает, что величина сигнала наибольшая на ближайшем к аноду зонде, а затем быстро уменьшается в несколько раз к выходному концу волновода. Зависимость от длины соленоида также свидетельствует о том, что генерация происходит в области виртуального катода. Максимальное значение мощности излучения виркатора было получено при длине соленоида 10 см, когда в магнитном поле находилась лишь область от катода до виртуального катода. По диаграмме излучения из выходного рупора и расчетам можно сделать заключение о том, что генерируется TE_{11} мода при $f = 3,0$ ГГц и TE_{12} мода при $f = 5,5$ ГГц, причем генерация происходит на частотах, близких к плазменным частотам электронного потока за анодом. Поэтому в виркаторах такого типа можно генерировать значительно более коротковолновое излучение, по крайней мере миллиметровое, если использовать сильноточные ускорители с более высокими параметрами, которые вполне доступны в настоящее время.

2.5. Виркатеры с синхронизацией фазы и частоты от внешнего генератора

Рассмотренные выше типы виркатеров являются автогенераторами, частота излучения которых определяется параметрами электронного потока, а ширина полосы излучения и эффективность зависят от параметров резонансной системы. Если в резонаторе до инжекции пучка уже имеется высокочастотное поле, то это приведет к изменению параметров сформированного в этих условиях потока с виртуальным катодом. Причем характер этого изменения будет зависеть от амплитуды поля и величины расстройки его частоты относительно собственной частоты потока без ВЧ-поля.

В НИИЯФ при ТПИ было предложено регулировку частоты триодного генератора с ВК производить с помощью изменения частоты внешнего генератора, используя нелинейный характер колебаний электронов в потенциальной яме триода [49]. Схема экспериментальной установки была аналогична приведенной на рис.2.1. Высокочастотная мощность импульсного магнетрона (400 кВт; 1,5 мкс) поступала в резонатор триода через окно связи в боковой стенке резонатора,

импульс ускоряющего напряжения 200 кВ подавался на катод - анодный промежуток диода с запаздыванием относительно СВЧ-импульса магнетрона. Триод генерировал импульс излучения мощностью 100+200 МВт на частоте, отличной от частоты магнетрона и частоты триода в режиме автогенерации. Так, при частоте магнетрона 2850 МГц и частоте триода 2620 МГц частота импульса излучения равнялась 3020 МГц. Изменение величины расстройки между частотой магнетрона и собственной частотой триода приводило к изменению частоты излучения по закону, который соответствовал закону изменения частоты нелинейного осциллятора под действием внешней периодической силы.

В Национальной лаборатории в Лос-Аламосе разрабатывается виркатор с синхронизацией частоты и фазы клистронным генератором [50]. Электронный пучок (1 МВ, 20 кА) через анодную фольгу попадает в цилиндрический резонатор, в котором и образуется ВК. Резонатор предварительно возбуждается от клистрона мощностью 10 МВт на частоте 1,3 ГГц, которая соответствует ТМ₀₂₀ моде резонатора, так что электронный пучок попадает в высокочастотное электрическое поле напряженностью 220 кВ/см, частота которого близка к собственной частоте виркатора. Это вынуждающее поле и будет синхронизовать виркатор с внешним генератором. Вывод мощности из виркатора происходит через четыре симметрично расположенные на боковой поверхности резонатора щели связи.

Сотрудниками фирмы "Физикс интернешинал" предложен виркатор с синхронизацией релятивистским магнетроном [51]. Источником напряжения для виркатора и магнетрона является один и тот же высоковольтный генератор.

Успешное развитие этих исследований позволит разработать способы эффективного управления частотой и фазой СВЧ-излучения виркаторов, что обеспечит им широкую область применения.

Нами описаны лишь наиболее исследованные типы виркаторов, не исчерпывающие, однако, всего многообразия СВЧ-приборов с виртуальным катодом, число которых, очевидно, будет увеличиваться (см., например, [52]).

Таким образом, виркаторы представляют новый класс релятивистских СВЧ-генераторов, способных генерировать гигаваттные уровни мощности в широком диапазоне длин волн - от дециметрового до миллиметрового. Представленные выше приборы имеют в основном демонстрационное назначение, работают в лабораторных условиях и весьма далеки от оптимальных параметров, но уже появились сообщения о создании промышленных образцов для практического применения [53].

3. РЕЛЯТИВИСТСКИЙ МАГНЕТРОН

Хорошо известные достоинства приборов со скрещенными полями, наиболее распространенным представителем которых является магнетрон [54], предопределили интерес к ним со стороны высокочастотной релятивистской электроники. Частотная и фазовая стабильность генерируемого излучения, высокий КПД, сравнительно небольшие массогабаритные характеристики и стоимость, низкий уровень побочных колебаний и гармоник, отсутствие ограничений по предельному вакуумному току стали основой для проведения интенсивных исследований релятивистских магнетронов. Первые же эксперименты, осуществленные в США [55] и в нашей стране (ИФ АН СССР, г. Горький [56], и НИИЯФ при ТГУ [57]), по-

зволюли получить в магнетронах беспрецедентные уровни мощности: от сотен мегаватт до нескольких гигаватт при КПД 10+30 %.

Использование сильноточных электронных ускорителей в качестве источников питания приборов магнетронного типа приводит к необходимости учета релятивистских эффектов. Условия малости релятивистских поправок сводятся к требованию малости геометрических размеров магнетрона, измеренных в единицах $N\lambda/4\pi$, где N - число резонаторов, λ - длина волны генерируемых колебаний на π -виде, и малости всех напряжений, измеренных в единицах $\frac{mc^2}{e}$ [54].

Теоретические оценки возможностей релятивистских магнетронов сделаны в работах [58-63] и подтверждают заметное влияние на процессы генерации релятивистской зависимости скорости от энергии электронов. Вместе с тем из-за отсутствия законченной теории даже для классического магнетрона ряд работ [64-66] посвящен численному моделированию релятивистских магнетронов с учетом влияния пространственного заряда и сильных высокочастотных полей. Расчет дисперсионных характеристик ЗС практически во всех работах проводился с использованием методов теории поля [54]. Вполне удовлетворительные совпадения расчетных и определенных в процессе холодных измерений и экспериментов на ускорителях значений частот видов колебаний [67-73] оправдывают использованные при расчетах допущения: бесконечно длинные вдоль оси катод и анод и неучет влияния пространственного заряда. Имеются сведения и о компьютерной оптимизации ЗС релятивистских магнетронов с точки зрения разделения видов колебаний по частоте и фазовой скорости [67,68].

К настоящему времени уже проведено достаточно большое количество экспериментов с релятивистскими магнетронами как в 10-, так и в 3-см диапазонах длин волн. В экспериментах использовались импульсные напряжения длительностью от 40 нс до 1 мкс и амплитудой 300+1500 кВ. Данные по выходным параметрам и наиболее интересные конструктивные особенности некоторых исследованных магнетронов сведены в табл.3.1.

3.1. Релятивистские аналоги классического магнетрона

Типичная схема экспериментов, используемая практически во всех работах, касающихся конструкций, аналогичных классическому магнетрону [27, 49, 51-53, 61, 64, 66, 69-91, 108, 109], показана на рис.3.1.

Анод. Многорезонаторный анодный блок, длина которого в различных экспериментах варьировалась приблизительно от $\lambda/3$ до 2λ , окружает варь-

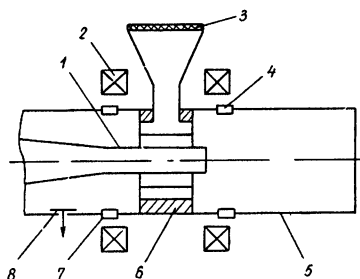


Рис.3.1. Схема экспериментов с релятивистским магнетроном:
1 - катод; 2 - магнитная система; 3 - выходное окно; 4 - шунт торцевого тока; 5 - труба дрейфа; 6 - ЗС; 7 - шунт полного тока; 8 - делитель напряжения

Результаты экспериментальных исследований релятивистских магнетронов

Место и год экспери- мента	Магнетрон		Ускоритель			СВЧ-излучение				Примечание	
	N	d, см	Вид коле- баний	U, МВ	I, кА	τ_u , нс	P, ГВт	f, ГГц	$\tau_{свч}$, нс		КПД, %
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Массажусет. технологич. эк-т (США), 1976 / 55 / ИФ АН СССР (г. Горь- кий), 1977 / 56 / НИИФ при ТПИ (г. Томск), 1978 / 57 / То же / 70 /	6	0,52	π	0,36	14	40	1,7	3,0	20	35	Тип ЗС не указан
	8	0,69	π	0,97	6	70	0,5	9,0	20	15	Дифракционный вывод мощно- сти
	6	0,9	π	1,2	4	60	2,0	2,4	30	40	Полугерметая ЗС
	6	1,35 0,92	π	0,3	6	800	0,9	2,9	300	43	Закртыя ЗС. Зазор 0,92 см указан с учетом движения катодной плазмы
Массажусет. технологич. эк-т (США), 1979 / 69 / НИИФ при ТПИ (г. Томск.), 1979 / 27 / Нац. лаб. Лоуренса (Ли- вермор, США), 1979 / 76 / Стандфорд. ун-т (США), 1978-1982 / 61, 71, 75, 80 /	6	0,53	2 π	0,36	12	30	0,9	4,6	-	20	ЗС ($\Delta f = 40$ МГц)
	6	1,35	π	1	23	60	10	2,9	30	43	Закртыя ЗС
	6	0,52	2 π	0,9	33	-	4,5	4,6	-	25	Симметричный вывод мощно- сти из всех резонаторов. Шайбовый катод
	12	2,5	π	0,5 0,4	4 3	1000 400	1 0,02	3,0 3,0	1000 35	50 1,9	Окисный подогретый катод. Вывод мощности с торца маг- нетрона на волне H ₀₁ . Вер- хняя строка - планирование, нижняя - полученные резуль- таты
НИИФ при ТПИ (г. Томск), 1979 / 72, 74 / ИФ АН СССР (г. Горь- кий), ИИ АН СССР (г. Москва), 1980 / 79 /	6	1,35	π	Р _{дуч} =5 ГВт, Р _{вых} =40 кВт; К _{ус} =30 дБ; $\Delta f=2,7+3,0$ ГГц							Регенеративный усилитель
НИИФ при ТПИ (г. Томск), 1983 / 81 /	8	0,64	π	1,0	12	-	4	9,2	-	12	Дифракционный вывод мощно- сти
	12	1,0	$\pi(-1)$ гарм.	0,7	22	60	8,3	2,4	40	47	Разнорезонаторная полуот- крытая ЗС типа щель - от- верстие

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II	12
"Физикс катернешнал" (Сан-Диего, США), 1985 / 83 /	6	0,52	2π	1,2	50	65	6,9	4,5	20+40	10+35	Шайбовый катод, симметрич- ный вывод мощности из всех резонаторов, дополнительный диод для согласования импеданса источника пита- ния и магнетрона
То же, 1986 / 84 /	6	-	π	1,1	25	80	0,05 >0,3	8,5	30	0,2	Волноводный вывод мощности из одного резонатора. Аксиальный вывод мощности из всех 6 резонаторов
То же, 1987-1988 / 88-109 /	6	0,84	π	0,7	20	65	3,2	2,8	20	II	Шайбовый катод, вывод мощ- ности из трех резонаторов
НИИФ при ТПИ (г.Томск),	6	1,35	π	0,64	6,2	60	1,0	3,0	30	До 20	Внешняя инжекция электрон- ного пучка. Виртуальный катод
ИИЭ АН СССР (г.Горь- кий), 1986-1988 / 52, 85 /	12	1,0	2π	0,25	4	1000	0,1	3,0	400	10	Разнорезонаторный матче- трон / 81 / . Виртуальный катод
НИИФ при ТПИ (г.Томск), 1987 / 86, 91 /	6	1,05	π	0,30	4	80	0,36	2,9	80	30	Источник напряжения ЛДУ, частота следования импуль- сов в пуле 180 Гц
ИРТ корп. (Сан-Диего, США), 1988 / 89 /	6	-	2π	0,35	7	10+20	0,2	4,4	-	-	Частота следования импуль- сов ≥ 1 Гц
Ун-т Сэв.Каролины, Рэлей, 1988	16	0,64	π или 7π/8	0,38	12	60	0,07	4,6	40	1,5	Разнорезонаторная открытая ЗС
Вариант Асс.Беверли, (США), 1988 / 108 /	16	0,94	3π/8	0,42	4	60	0,08	3,3	40	4,5	С резонаторами лопаточного типа
Военно-морская лад. (Вашингтон, США), 1979-1980 / 92-94 /	54	-	π	0,60	9	55	1,0 0,1	3,2 3,2	40	18	Гибридный обращенный коак- сиальный магнетрон. В ниж- ней строке данные для ра- боты без предварительного возбуждения
Массачусет. технологич, ин-т (США), 1983 / 95 /	8	1,38	π	2,0	4	-	0,4	3,7	30	До 12	Обращенный магнетрон (Δf ≈ 50 МГц)
	10	0,84	π	1,6	9	-	0,5	3,7	30	3,5	Вывод мощности через щели связи в катоде

Окончание табл. 3.1

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Нац. лаб. Сандия (Аль-Сатерке, США), 1986 [96]	I2	1,56	π	1,0	5	-	0,1	3,15	5+70	2,0	Обращенный магнетрон ($\Delta f = 25$ МГц). Аксиальный вывод мощности на волне H_{01}
НИИФ при ТПИ (г. Томск), 1987 [98, 99, 101]	8	1,1	π	0,5	6,0	1500	0,1	3,3	1200	4	$\Delta f \sim 260$ МГц
	10	1,0	π	0,5	6,0	1200	0,2	4,3	1000	6	$\Delta f \sim 600$ МГц
	I2	1,0	π	0,4	8,5	1000	0,35	2,6	700	10	Обращенный магнетрон. Аксиальный вывод мощности на волне H_{01}
То же, 1988 [100]	48	1,0	π	0,4	5,5	1000	0,1	10,3	700	5	Обращенный коаксиальный магнетрон

Примечание. N - число резонаторов ЗС; d - межалектродный зазор; U - напряжение; I - ток; τ_{μ} - длительность импульса напряжения; P - генерируемая мощность; f - центральная частота; $\tau_{\text{свч}}$ - длительность СВЧ-импульса; Δf - полоса генерации (для регенеративного усилителя - полоса перестройки задающего генератора).

возмиссионный холодный катод. В качестве материала для изготовления анодного блока использовались нержавеющая сталь, алюминий, медь (или теллуровая медь), нержавеющая сталь, покрытая электроосажденной медью. При сохранении практически неизменными выходных параметров магнетрона использование нержавеющей стали увеличивает долговечность прибора, поскольку ламели такой ЗС менее подвержены эрозии анодным током, составляющим несколько килоампер.

Влияние длины анодного блока на работу релятивистского магнетрона исследовано слабо. В большинстве работ были использованы так называемые длинноанодные ЗС ($L \sim \lambda$, где L — длина анодного блока). Увеличение длины ЗС до 2λ [84] приводило к росту генерируемой мощности. Такой же результат ожидают получить и авторы работы [108], в которой выбор длины ЗС $\sim \lambda/3$ был обусловлен стремлением сохранить частотное разделение аксиальных мод.

Весьма скудна информация и о влиянии формы поперечного сечения резонаторов ЗС на характеристики магнетрона. Кроме работ, в которых описано использование челевых резонаторов [52, 79] и резонаторов типа щель — отверстие [81], во всех остальных конструкциях применялись резонаторы лопаточного типа.

Вопрос влияния аксиального распределения высокочастотного поля в пространстве взаимодействия исследован более подробно [27, 53, 69, 70, 73, 78, 81–88]. С этой целью на торцах анодного блока устанавливались закорачивающие кольца и таким образом ЗС могла быть открытой, закрытой или полукрытой. В большинстве экспериментов максимальная мощность получена для закрытой системы. Понятно, что, кроме распределения поля, ЗС различных типов отличаются также и нагруженной добротностью, и характеристическим сопротивлением, т.е. в экспериментах оптимизировались и эти параметры. Попытка [108] реализовать ЗС с торцевыми полостями длиной около 1 см оказалась неудачной вследствие конкуренции видов колебаний.

С целью увеличения рабочего объема магнетрона и выходной мощности за счет увеличения числа резонаторов в работах [81, 108] исследовались разнорезонаторные магнетроны с $N = 12$ и $N = 16$ соответственно. В других магнетронах использовались равнорезонаторные системы и число резонаторов не превышало 8 (см. табл.3.1). Как известно, разнорезонаторные ЗС позволяют увеличивать число резонаторов при сохранении удовлетворительного разделения видов колебаний по частоте. Однако именно проблема конкуренции видов оказалась основной в обеих работах. Наблюдалось одновременное возбуждение $\pi/2$ - и $\pi/3$ -видов колебаний [81], перескок с $3\pi/8$ -вида на π - или $7\pi/8$ -вид в течение импульса (рис.3.2). Хотя в работе [81] не удалось возбудить основной π -вид колебаний в полукрытой системе, тем не менее на -1 -й гармонике $\pi/6$ -вида колебаний получены достаточно большие значения КПД и выходной мощности (рис.3.3). В закрытой системе возбуждался только π -вид колебаний, причем КПД не превышал 4 %.

Здесь необходимо заметить, что и в этих, и во всех предшествующих работах идентификация вида колебаний осуществлялась сравнением соответствующих величин измеренных и расчетных параметров (напряжение, магнитное поле, частота), а также параметров, определяемых на холодных измерениях (частота и геометрия пространства взаимодействия). Непосредственные измерения фазового сдвига колебаний в соседних резонаторах впервые осуществлены в работе

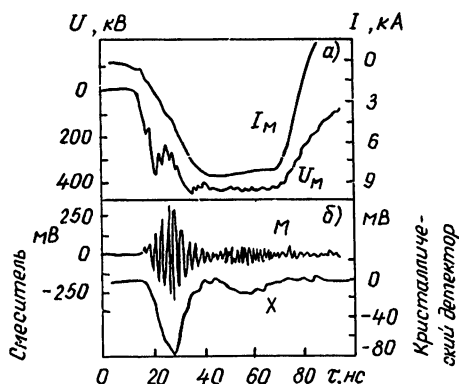


Рис.3.2. Осциллограммы импульсов напряжений U , полного тока I (а) и СВЧ-излучения (X, M) (б), демонстрирующие модовый сдвиг в релятивистском магнетроне [108]:

X - сигнал кристаллического детектора ($P = 51$ и 12 МВт соответственно); M - сигнал со смесителя ($f = 3,3$ и $4,5$ ГГц; $P = 53$ и 10 МВт соответственно)

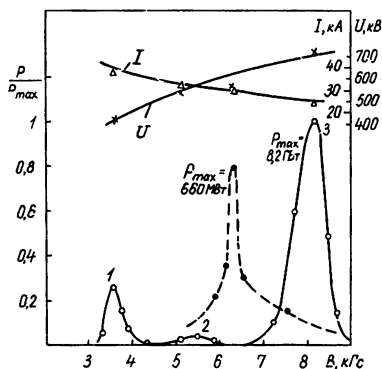


Рис.3.3. Зависимости напряжения ($\times$), тока (Δ) и мощности СВЧ-излучения от магнитного поля для разнорезонаторного магнетрона [57]:

--- - закрытая замедляющая система (π -вид); — - полукрытая замедляющая система; 1 - $\pi/2$ -вид колебаний ($\lambda \sim 14$ см); 2 - $\pi/3$ -вид колебаний -1-й гармоники ($\lambda \sim 10$ см); 3 - $\pi/6$ -вид колебаний -1-й гармоники ($\lambda \sim 12,7$ см)

[109], где экспериментально зарегистрировано значение разности фаз, равное π рад.

Катод. На выходные параметры релятивистского магнетрона должны существенно влиять материал и конструкция взрывоэмиссионного катода, его размещение относительно ЗС, величина межэлектродного зазора.

В качестве материала катода для релятивистского магнетрона использовались графит, нержавеющая сталь, медь, латунь, молибден. При прочих равных условиях графит имеет некоторые преимущества, связанные с уменьшением времени запаздывания появления эмиссионных центров. При этом [110] увеличивается стабильность тока диода, а при длительности импульса напряжения $5+10$ нс и магнитном поле $3+5$ кГс примерно на порядок увеличивается и ток диода по сравнению с катодами из меди и нержавеющей стали. Для режима работы с одианными импульсами напряжения длительностью ≥ 50 нс эти свойства графита становятся не столь важными и в качестве материала катода могут быть использованы металлы, поскольку графит заметно загрязняет ЗС уже через $10+15$ выстрелов [67].

В большинстве работ [27, 51-57, 69, 70, 72-74, 77-79, 82, 85-87, 91] катод представлял собой цилиндрический электрод, расположенный аксиально и по всей длине ЗС. В недавних экспериментах [83, 84, 88, 108] подробно исследован так называемый шайбовый катод [76], представляющий собой диск из нержавеющей стали диаметром, превышающим диаметр катододержателя. Отмечается, что для всех условий шайбовый катод обеспечивает уровень СВЧ-мощности, превышающий полученный при использовании цилиндрического катода, что связ-

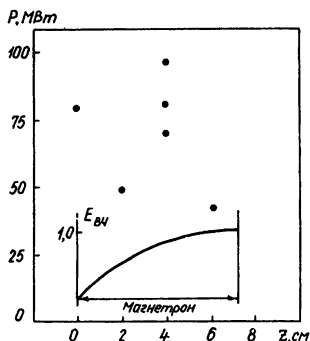


Рис.3.4. Зависимость СВЧ-мощности от аксиального расположения шайбового катода [83] и аксиальное распределение амплитуды компонент высокочастотного поля для полукрытого 3С

добротность магнетрона с шайбовым катодом [108].

Важным параметром релятивистского магнетрона является величина межэлектродного зазора, определяющая эффективность взаимодействия на различных видах колебаний. На рис.3.6 приведены расчетные конфигурации полей π - и 2π -видов для узкого и широкого зазора. Видно, что для широкого зазора (для релятивистских магнетронов 10-см диапазона зазор превышает 7 мм) оптимальным является π -вид колебаний из-за примерно одинакового распределения азимутальной и радиальной компонент высокочастотного поля. Этот вывод подтверждается и экспериментами [27, 28, 51-57, 64, 73, 77-79, 81, 82, 85-97, 108]. Для узкого зазора, используемого в работах [64, 66, 69, 83, 84, 88, 90, 108], оптимальным с точки зрения получения высокой выходной

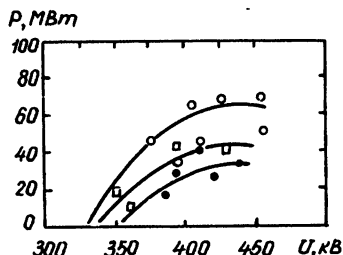


Рис.3.5. Влияние длины катода на мощность излучения релятивистского магнетрона [108]:
• - 0,32 см; □ - 2,54 см; ○ - 1,27 см

вается с увеличением эмиссии и инжекцией электронов в оптимальную для генерации область. Рис.3.4 иллюстрирует зависимость выходной мощности от осевого положения шайбового катода. Анодный блок в этом случае был полукрытым. Соответствующее распределение компонент ВЧ-поля вдоль оси показано на этом же рисунке.

Длина "шайбы" также заметно влияет на уровень выходной мощности (рис.3.5) вследствие изменения аксиального распределения напряженности приложенного электрического поля в пространстве взаимодействия и величины эмитируемого тока.

Конструкция катода сказывается и на стабильности генерируемых СВЧ-импульсов. Так, магнетрон с цилиндрическим графитовым катодом имеет добротность, в 2 раза превышающую

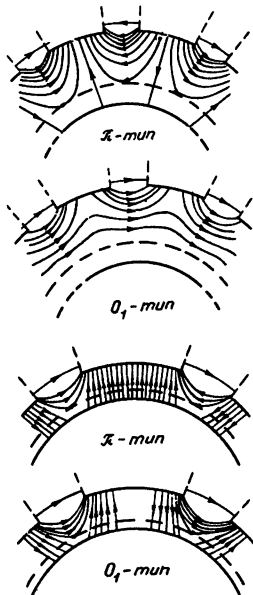


Рис.3.6. Конфигурации высокочастотных электрических полей π - и 2π -вида для широкого и узкого зазора [88]

мощности становится $2X$ -вид, который к тому же хорошо отделен от других видов по частоте. Однако работа с узким зазором предъявляет жесткие требования к центровке катода. При зазоре около 5 мм радиальное смещение катода на 1 мм имеет следствием трехкратное падение мощности относительно уровня, генерируемого при радиальном смещении в пределах $\pm 0,1$ мм [108].

Как и в классическом, в релятивистском магнетроне необходимо решать проблему ограничения тока, уходящего в торцы из пространства взаимодействия. Применение по аналогии с классическим магнетроном концевых экранов оказалось невозможным вследствие паразитной электронной эмиссии с них и развития пробоя [61, 75, 80, 108]. Для релятивистского магнетрона представляется более естественным ограничение тока посредством увеличения диаметра и длины цилиндрической полости, сопряженной с пространством взаимодействия, и соответственно снижения величины предельного вакуумного тока в трубе дрейфа. Подобное ограничение можно обеспечить, устанавливая последовательно с анодным блоком диэлектрическую камеру, помещенную, как и магнетрон, в продольное магнитное поле. Применение такого устройства [82] позволило приблизительно на 20 % увеличить КПД и генерируемую мощность.

В релятивистском магнетроне причиной аксиального дрейфа электронов является не только электростатическое расталкивание за счет накопления пространственного заряда в межэлектродном зазоре, но и наличие в пространстве взаимодействия азимутального магнитного поля, создаваемого током, текущим по катоду. Выходная мощность резко уменьшается, когда ток, текущий через магнетрон, превышает 15+20 кА для условий эксперимента [83]. Этот эффект обсуждался и в работах [69, 95], а в работе [63] дан его теоретический анализ. Отмечается, что условие Бунемана - Харты изменяется с ростом аксиального тока. С целью снижения величины азимутального магнитного поля предлагается катод выполнять в виде спирали [69].

Вывод СВЧ-мощности. Вывод мощности практически во всех приборах (см. рис.3.1) осуществляется с помощью плавного волноводного перехода, работающего на нижней моде прямоугольного волновода H_{10} и связанного щелью связи с одним из резонаторов анодного блока. Асимметрия такого вывода может стать причиной неустойчивого возбуждения и нестабильной работы магнетрона на рабочем виде колебаний. Авторами [76] с целью сохранения симметрии распределения поля в пространстве взаимодействия было предложено выводить мощность из всех резонаторов анодного блока в одинаковые нагрузки. Измерение мощности осуществлялось от одного вывода с последующей экстраполяцией на все остальные в предположении равенства всех мощностей. Ожидаемого увеличения мощности, однако, получено не было, и зарегистрированный уровень в 4,5 ГВт определялся шайбовой конструкцией катода и повышенным (в сравнении, например, с [55, 69]) значением напряжения. Дальнейшее развитие этого способа вывода [83, 84, 88] показало влияние числа выводных секций на выходную мощность (рис.3.7), что может быть связано с оптимизацией величины нагруженной добротности ЗС и ее характеристического сопротивления. Вместе с тем исследования влияния внешней нагрузки на выходную мощность [108] продемонстрировали слабую чувствительность магнетрона с выводом мощности через один резонатор к этому параметру. Изменение размера щели связи в пределах 26+100 % от раскрытия резонатора не изменяло характеристик генерируемых СВЧ-импульсов. В

связи с этим можно сделать вывод о незначительных нарушениях азимутальной симметрии высокочастотного поля в пространстве взаимодействия при таком способе вывода.

Существенно отличается от вышеупомянутых вывод мощности магнетронов [56, 79], работавших в 3-см диапазоне длин волн. Он выполнен в виде конического рупора, образованного плавнораскрывающимися продолжениями резонаторов ЗС (рис.3.8) и обеспечивающего дифракционную связь магнетрона с цилиндрическим волноводом. Подобные системы применяются в мощных гиротронах и обеспечивают, кроме повышения электропрочности вывода, еще и селекцию видов колебаний по аксиальному индексу вследствие уменьшения добротности моды с ростом ее продольного числа. Дифракционный вывод позволяет также уменьшить торцевой ток релятивистского магнетрона за счет естественного увеличения размеров области дрейфа электронов, уходящих из пространства взаимодействия.

Анодное напряжение и ток. В ряде работ [73, 87-89, 108] исследовано влияние величины анодного напряжения и тока магнетрона на характеристики релятивистского магнетрона. Однако применение в качестве источников напряжения сильноточных ускорителей, имеющих формирующие линии с различным волновым сопротивлением, отличающиеся трубы дрейфа и катоды и т.д. затрудняют однозначную интерпретацию полученных результатов.

В работах [73, 88, 89, 108] отмечается экспоненциальный рост мощности с ростом напряжения источника питания (см., например, рис.3.5).

В отличие от этого результата в работе [87] зарегистрирован практически линейный рост мощности СВЧ-излучения с увеличением анодного напряжения (рис.3.9). КПД магнетрона в пределах точности измерений был в этом эксперименте практически постоянным, в то время как с увеличением анодного напряжения и полного тока магнетрона наблюдался линейный рост КПД [88].

Практически во всей литературе электронный КПД генераторов оценивался по отношению к мощности формируемого электронного пучка. Только в работах [56, 79] при оценках использовалась величина анодного тока, что, вообще говоря, дает завышенное значение, поскольку часть электронов, уходящих из пространства взаимодействия в аксиальном направлении, участвует тем не менее в процессе энергообмена. Это подтверждается и результатами экспериментальных исследований магнетронов с внешней инжекцией электронного пучка [52, 76],

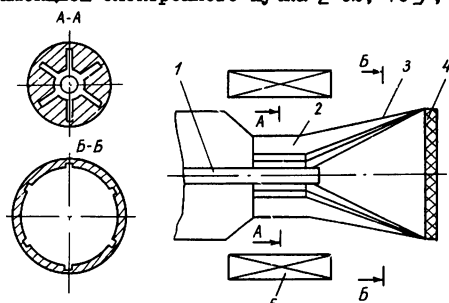
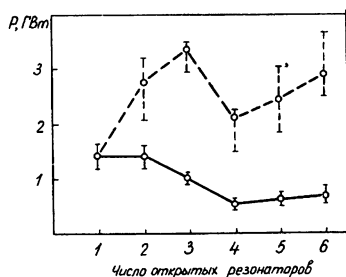


Рис.3.8. Схема дифракционного вывода мощности [56, 79]:
1 - катод; 2 - ЗС; 3 - дифракционный вывод; 4 - выходное окно; 5 - соленоид

Рис.3.7. Влияние числа выходных секций на уровень СВЧ-мощности [88]:
--- - полная мощность;
— - мощность на один резонатор

о которых речь пойдет ниже. Однако, если КПД генератора оценивать по отношению к мощности, запасаемой в накопителе источника питания, то этот КПД существенно ограничивается разницей в импедансах диода и генератора импульсного напряжения. Импеданс магнетронного диода имеет величину порядка $40+100 \text{ Ом}$, в то время как волновое сопротивление источника питания в известных работах не превышает 20 Ом . С целью обеспечения работы источника питания на согласованную нагрузку параллельно магнетрону включались или дополнительный вакуумный диод, или балластная жидкостное сопротивление переменной величины [83, 84, 88]. Понятно,

что более выгодным было бы параллельное включение нескольких магнетронов, работающих, например, на одну нагрузку, поскольку упомянутые меры, обеспечивая согласованный режим работы источника питания, обостряют проблему, связанную с наличием в пространстве взаимодействия азимутального магнитного поля, создаваемого током, текущим по катоду магнетрона.

Представляют существенный интерес эксперименты [83], в которых исследовалось влияние повышенных значений напряжения или тока на работу релятивистского магнетрона. Повышение напряжения обеспечивалось применением систем с отражательными ключами [III] (рис.3.10).

В данном случае импульсы напряжения магнетрона формируются системой, накаливающей магнитную энергию. В закрытой фазе коаксиальная индуктивность, образованная катодом и анодом магнетрона (см. рис.3.10,а), заряжается от генератора импульсных напряжений через низкоимпедансный (4 Ом) отражательный диод. Низкий импеданс диода обусловлен наличием в системе K_1 – анод – K_2 биполярного потока отраженных от K_2 электронов и ионов, образованных на аноде. При этом напряжение на магнетроне не достигает порога генерации для приложенного внешнего магнитного поля. Открытая фаза начинается, когда дополнительный катод K_2 электрически соединяется с анодом. Напряжение на катоде K_1 резко (в течение $\sim 10 \text{ нс}$) возрастает. В эксперименте [83] импульс мощности, прикладываемый к магнетрону, сжимается в 2 раза.

Основной проблемой такого способа питания магнетрона при несомненном достоинстве – возможности повышения импульсного напряжения – является требование высоких значений тока для обеспечения работы ключа. Поэтому продолжение работ [83] было связано с устранением протекания тока от диода с отражательным ключом через магнетрон. В данной схеме (см. рис.3.10,б) отражательный ключ был расположен перед магнетроном, пучок эмитировался со второго катода и распространялся по камере дрейфа в магнетрон. Эта схема основана на исследованиях магнетрона с внешней инжекцией электронного пучка [76], когда катод был полностью вынесен из пространства взаимодействия.

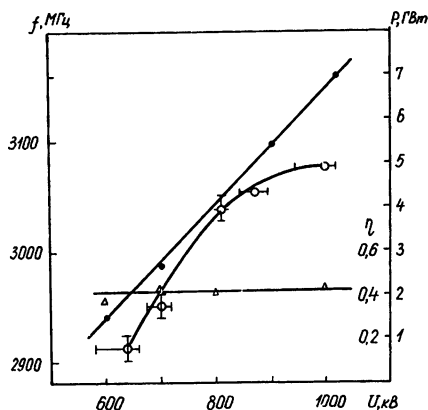


Рис.3.9. Зависимости мощности (•), КПД (×) и частоты (Δ) от анодного напряжения ($f_{\text{кол}} = 3160 \text{ МГц}$) [87]

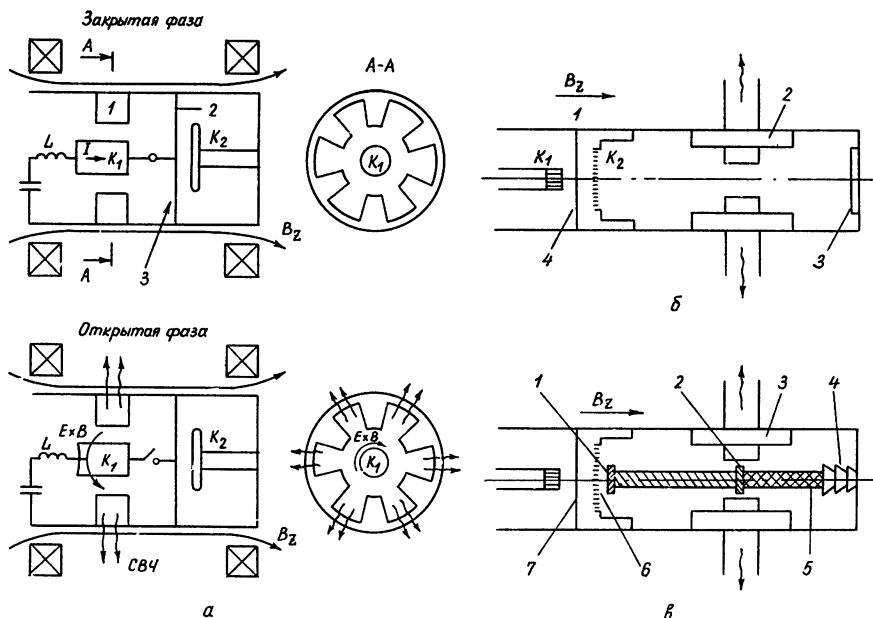


Рис.3.10. Схемы экспериментов с использованием отражательных ключей [83]: а) питание магнетрона с использованием отражательного ключа: 1 - резонатор; 2 - анод; 3 - отражательный ключ; б) магнетрон с внешней инжекцией пучка от диода с отражательным ключом: 1 - анод; 2 - магнетрон; 3 - коллектор; 4 - отражательный ключ; в) питание магнетрона от инверсного диода с отражательным ключом: 1 - графитовый коллектор; 2 - катод магнетрона; 3 - магнетрон; 4 - изолятор; 5 - нейлоновый стержень; 6 - инверсный диод; 7 - отражательный ключ

Авторы [83] повторили этот эксперимент и при напряжении 1,2 МВ и токе, распространяющемся через магнетрон, 4+8 кА получили мощность на один волновод 0,1+1,0 ГВт. Более подробно такая конструкция релятивистского магнетрона описана в работе [52] и будет рассмотрена ниже. При использовании в качестве источника электронов диода с отражательным ключом в такой схеме получить высокий уровень генерации не удалось, поскольку для работы отражательного ключа необходим дополнительный анод (см. рис.3.10,б), который в свою очередь вызывает рассеяние электронов и изменяет распределение их продольной и поперечной скорости таким образом, что нарушаются условия синхронизма.

Схема с использованием отражательного ключа и так называемого инверсного диода (см. рис.3.10,в) была более успешной с точки зрения ликвидации эффекта азимутального магнитного поля. В этой схеме ток от диода с отражательным ключом принимается на коллектор, электрически связанный с катодом магнетрона. Эти эксперименты будут продолжены, поскольку в данной работе уровень мощности был ограничен сравнительно небольшими значениями напряжения.

Частотные характеристики радиоимпульса. В ряде работ [69, 87, 88, 95, 96, 98] проведены исследования спектрального состава радиоимпульсов, генерируемых релятивистским магнетроном. В экспериментах использовались дисперсионные линии [69, 95], полосковые перестраиваемые фильтры [87, 98], гетеродинные системы с автоматизированной обработкой [88, 98]. Для релятивистских магнетронов характерна сравнительно узкая полоса генерируемого сигнала, составляющая 20 ± 60 МГц в зависимости от типа ЗС. Особняком стоит лишь эксперимент с обращенным магнетроном [98], в котором частотная полоса сигнала доходила до 600 МГц, что, видимо, связано с особенностями работы в микросекундном диапазоне длительностей импульса и плазменными процессами в межэлектродном промежутке.

Наблюдается сдвиг частоты в течение импульса [88]: при полной длительности СВЧ-импульса ~ 30 нс центральная частота для первых 15 нс составляет 2,83 ГГц с дальнейшим повышением к концу импульса до 2,9 ГГц. Также на краю импульса отмечается наличие компоненты с частотой 4,1 ГГц и уровнем мощности на 6+9 дБ меньше основного сигнала.

Зарегистрирован эффект электронной настройки релятивистского магнетрона [87]: увеличению напряжения на 0,2 МВ соответствовал рост центральной частоты на 35 ± 40 МГц (см. рис.3.9). В этом эксперименте в пределах чувствительности используемой аппаратуры гармонических составляющих основной частоты обнаружено не было, причем порог обнаружения 2-й гармоники не превышал -28 дБ, 3-й гармоники -35 дБ. Однако было зафиксировано сопутствующее основному излучению 10-см диапазона длин волн мощное излучение с длиной волны короче 2,5 мм. Изменение амплитудных значений этого излучения, хода зависимости его мощности от магнитного поля хорошо коррелирует с соответствующими изменениями параметров 10-см сигнала. Оценка мощности коротковолнового излучения, проведенная с помощью калориметра, дает величину порядка 100 мВт. Характерными особенностями этого излучения являются связь уровня мощности с состоянием эмитирующей поверхности катода и линейная поляризация, соответствующая поляризации 10-см сигнала.

Релятивистский магнетрон был использован и в качестве регенеративного усилителя [72], обеспечив коэффициент усиления 30 дБ в полосе частот $2,7 \pm 3,0$ ГГц.

В работе [90] сообщается об экспериментальной реализации фазовой синхронизации двух релятивистских магнетронов, работающих на 2Ж-виде с уровнем мощности около 300 мВт. Продемонстрирована хорошая воспроизводимость фазовой синхронизации в пределах 1 нс и соответствующее увеличение плотности потока мощности при сложении мощностей генераторов в дальней зоне.

Импульсно-периодический режим работы. Очевидно, что перспективы практических применений релятивистских генераторов непосредственно связаны с возможностью работы в импульсно-периодическом режиме.

Первые результаты экспериментальных исследований релятивистского магнетрона, источником напряжения которого служила секция линейного индукционного ускорителя (ЛИУ) в режиме пуга наносекундных импульсов, приведены в работах [86, 91].

Использованная в экспериментах секция ЛИУ построена по разработанной в НИИЯФ при ТПИ компоновочной схеме, в основу которой положен принцип кон-

структивного совмещения в пределах единого корпуса всех основных узлов: ферромагнитной индукционной системы, генератора импульсного напряжения в виде двойной формирующей полосковой линии (ДФЛ), коммутатора - многоканального разрядника, системы размагничивания ферромагнитных сердечников и электронного диода (рис.3.II). Ускоритель работает в двух частотных режимах

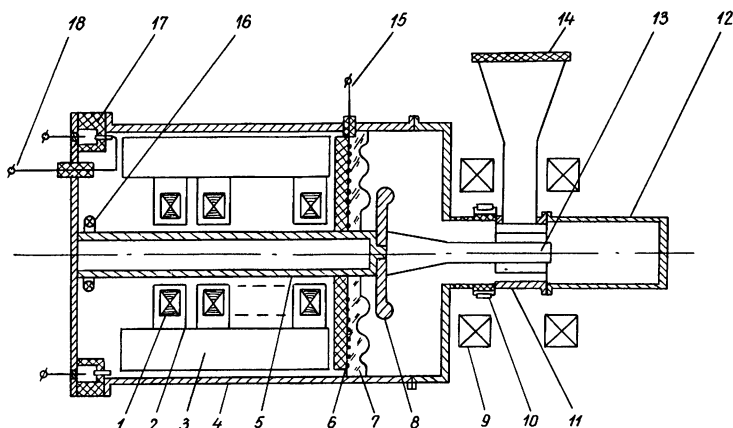


Рис.3.II. Схема эксперимента на ЛДУ [86, 91]:
1 - ферромагнитные сердечники; 2 - намагничивающие витки; 3 - полосковая ДФЛ; 4 - корпус; 5 - электрод; 6 - спираль индуктивности размагничивания; 7 - проходной изолятор; 8 - экран; 9 - пара Гельмгольца; 10 - шунт обратного тока; 11 - магнетрон; 12 - труба дрейфа; 13 - катод; 14 - антенна; 15 - ввод размагничивания; 16 - пояс Роговского; 17 - многоканальный разрядник; 18 - высоковольтный ввод зарядки ДФЛ

с частотой следования до 50 Гц либо в пачке импульсов 5+10 Гц с частотой следования до 160 Гц при напряжении на согласованной нагрузке (130 Ом) 450+480 кВ и токе 3+4 кА длительностью 80 нс.

В результате проведенных исследований показана возможность работы релятивистского магнетрона с периодическим следованием импульсов напряжения: 3 импульса с частотой 160 Гц. Параметры генерируемого СВЧ-сигнала составляли: $P \sim 360$ МВт, электронный КПД 30 %. Характерной особенностью работы прибора является рост рабочего тока в области синхронного магнитного поля, что возможно лишь при сравнимых величинах напряженности электрической составляющей высокочастотного поля и постоянного электрического поля в межэлектродном зазоре. Результаты эксперимента показаны на рис.3.I2. Следует отметить хорошую повторяемость формы и амплитуды генерируемых СВЧ-импульсов.

Возможность работы релятивистского магнетрона в импульсно-периодическом режиме исследовалась и в работе [89]. Частота следования составляла > 1 Гц.

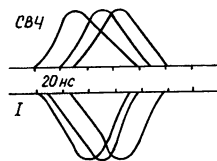
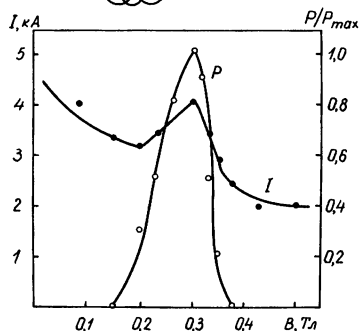


Рис.3.12. Типичные осциллограммы и зависимости рабочего тока магнетрона и мощности СВЧ-излучения от магнитного поля для эксперимента на ЛИУ ($P_{max} = 360$ МВт)



3.2. Особенности работы релятивистского магнетрона в микросекундном диапазоне длительностей импульса напряжения

Практически во всех вышеупомянутых экспериментах отмечается заметное отличие длительности генерируемого СВЧ-импульса от длительности импульса напряжения. В качестве возможных причин этого явления предположительно назывались переключение резонаторов анодной плазмой, возникающей при разогреве ламелей ЗС электронным током [56], высокочастотный пробой в магнетроне или устройстве вывода [55], критичность прибора к форме анодного напряжения [69]. Первоначально вывод о влиянии неоптимальной формы импульса напряжения на длительность СВЧ-импульса был сделан и для микросекундного диапазона длительностей [70], однако более подробные исследования [27, 78] показали, что заметный спад амплитуды напряжения во времени сам по себе является следствием процессов, происходящих в магнетронном диоде. Наличие в межэлектродном промежутке высокочастотного поля, напряженность которого сравнима с напряженностью приложенного электрического поля, вызывает увеличение примерно в 4,5 раза скорости радиального движения катодной плазмы. Сокращается эффективный анод-катодный зазор, изменяется импеданс диода, падает амплитуда напряжения, внешнее магнитное поле становится меньше критического, нарушаются условия синхронизма. Следствием этого является срыв генерации.

Таким образом, возможность успешной работы магнетрона в микросекундном диапазоне длительностей связана с устранением влияния катодной плазмы на процесс генерации. С этой целью исследовались магнетроны с внешней инжекцией электронного пучка и обращенные магнетроны.

Кроме того, с целью получения СВЧ-импульсов с энергией 1 кДж при длительности 1 мкс была сделана попытка использовать в релятивистском магнетроне термоэмиссионный катод [61, 75, 80]. Основные отличия этого магнетрона —

увеличенные диаметр анодного блока (10 см) и размер межэлектродного зазора (2,5 см), оксидный катод с подогревателем с концевыми экранами и выходной трансформатор, представляющий собой пластину с 6 отверстиями, которые индуктивно связывают π -вид ЗС с модой H_{01} выходного цилиндрического волновода. В работе предполагалось получить СВЧ-импульсы с энергией 1 кДж при напряжении $U = 500$ кВ, токе $I_0 = 4$ кА длительностью 1 мкс. Однако плазменные процессы в межэлектродном зазоре ограничили и длительность СВЧ-импульса (35 нс), и выходную мощность (~ 20 МВт).

3.3. Релятивистский магнетрон с внешней инжекцией электронного пучка

Одним из путей устранения влияния катодной плазмы на процесс генерации является вынос катода из пространства взаимодействия. Работоспособность такого магнетрона показана в литературе [76]. Основной экспериментов в нано- и микросекундном диапазонах длительности импульса [52, 89] стали предположения, что отсутствие взрывоэмиссионного катода в пространстве взаимодействия даст возможность обеспечить электронную настройку магнетрона и снимет ограничения на допустимую величину напряженности статического электрического поля и на длительность импульса СВЧ-излучения вследствие устранения катодной плазмы. В этих экспериментах катод был вынесен из пространства взаимодействия, а к магнетрону подключен дополнительный магнитоизолированный диод, что позволяло варьировать величину инжектируемого тока (рис.3.13).

Статическое электрическое поле в области ЗС создается пространственным зарядом электронного пучка, и таким образом собственное электрическое поле пучка и внешнее продольное магнитное поле образуют в пространстве взаимодействия скрещенные поля, обеспечивающие синхронизм азимутального дрейфа электронов с высокочастотным полем ЗС.

Механизм взаимодействия электронов с СВЧ-полем ЗС остается таким же, как и в магнетроне с катодом в пространстве взаимодействия, а условие синхронизма имеет вид:

$$\frac{m_0 c^2}{e B} \frac{\gamma'_0 - \gamma'_g}{R_g \ell n(R_n/R_g)} \approx \frac{2\pi R_n}{\lambda (n \pm mN)},$$

где e и m_0 – заряд и масса покоя электронов, c – скорость света, U – напряжение на дополнительном диоде, λ – длина волны, R_g – радиус электронного пучка, R_n, N – внутренний радиус и число резонаторов ЗС, $n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$ – номер вида колебаний, $m = 0, 1, 2, \dots$ – номер пространственной гармоники, B – магнитное поле.

Вместе с тем электронный пучок в пространстве взаимодействия может находиться в различных состояниях: как в высокоэнергетическом ($\gamma'^{4/3} < \gamma'_g < \gamma'_0$), так и в состоянии с виртуальным катодом ($\gamma'_g = 1$).

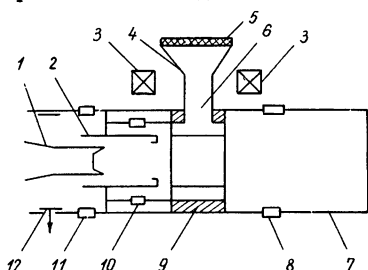


Рис.3.13. Схема эксперимента с магнетроном с внешней инжекцией электронного пучка [52, 85]: 1 – катод; 2 – дополнительный анод; 3 – магнитная система; 4 – рупор; 5 – выходное окно; 6 – щель связи; 7 – труба дрейфа; 8 – шунт торцевого тока; 9 – ЗС; 10 – шунт анодного тока; 11 – шунт полного тока; 12 – делитель напряжения

В случае высокоэнергетического состояния пучка минимальное значение его кинетической энергии $\gamma_{\text{б, min}} = \gamma_0^{1/3}$ и предельно возможный КПД без учета потерь на энергию циклотронного вращения электронов ограничен величиной

$$\eta = 1 - \frac{\gamma_0' - 1}{\gamma_0 - 1} = \frac{\gamma_0' - \gamma_0^{1/3}}{\gamma_0 - 1}.$$

Состояние с виртуальным катодом характеризуется минимальной кинетической энергией ($\gamma_{\text{б}} = 1$). Максимально возможный КПД, так же как и в релятивистских магнетронах с катодом в пространстве взаимодействия, равен $\eta_{\text{max}} = 1$.

И то и другое состояние имеет свои преимущества. В случае высокоэнергетического состояния, как и в обычных лучевых приборах М-типа, можно избежать осаждения электронов на поверхность ЗС, если длину пространства взаимодействия выбрать такой, чтобы время пролета электронов через него было меньше времени их дрейфа к поверхности. Это позволяет вынести коллектор за пределы пространства взаимодействия и тем самым избавиться в нем от возможного образования анодной плазмы. Одновременно расширяется и полоса отрицательной проводимости пучка из-за уменьшения времени взаимодействия электронов с высокочастотным полем. Расширение полосы благоприятно сказывается на эффективности излучения пучка с сильным расслоением по азимутальным дрейфовым скоростям. Еще одна особенность работы прибора в таком режиме – возможность настройки напряжением. Оценки КПД по приведенному выражению показывают, что при типичных параметрах сильноточных электронных ускорителей ($U \sim 1+2$ МВ) пролетный магнетрон проигрывает по эффективности магнетрону с катодом в пространстве взаимодействия ($\sim 20+30$ %). Однако с ростом напряжения (энергии электронов) эффективность этого прибора растет. Тем не менее с точки зрения получения высоких значений КПД предпочтительнее состояние с ВК.

Параметры электронного пучка и соответственно структура его собственных квазистатических полей варьировались в процессе экспериментов путем изменения диаметров катода, анода, трубы дрейфа, а также посредством установки на входе в пространство взаимодействия различных диафрагм, моделировавших условия инжекции электронного пучка в полуграниченный канал транспортировки.

В экспериментах были практически реализованы упомянутые физические предпосылки, и некоторые полученные результаты приведены в табл.3.1.

Следует отметить влияние на уровень выходной мощности и КПД условий формирования пучка, местоположения ВК относительно распределения высокочастотного поля, временной устойчивости этого состояния электронного пучка, а также реализованный в эксперименте эффект настройки магнетрона напряжением, рост КПД прибора с увеличением напряжения на диоде.

Эти работы фактически являются демонстрационными и должны послужить основой дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

3.4. Обращенные релятивистские магнетроны

С точки зрения получения микросекундной генерации представляют интерес и обращенные релятивистские магнетроны [64, 66, 92-101], поскольку длительность импульса напряжения в обращенном магнитоизолированном диоде в 3-4 раза выше по сравнению с обычными диодами [85, 97]. Кроме этого, очевидно, что такая схема (рис.3.14-3.16) обеспечивает отсутствие торцевого тока.

В работах [64, 66, 92-94] приведены результаты экспериментов с гибридным обращенным коаксиальным магнетроном 10-см диапазона длин волн. В этой системе многорезонаторный анодный блок с 54 резонаторами окружен взрывоэмиссионным катодом с вделанной в него на четверть длины окружности плосковой линией для предварительного возбуждения (в других вариантах для этой цели служила катодная система на встречных штырях). Замедляющая система щелями связи, прорезанными в резонаторах через один, связана с высокодобротным ($Q_H = 500$) коаксиальным резонатором, который имеет настроечный поршень и в свою очередь связан 24 аксиальными, симметрично расположенными по азимуту щелями с выходным цилиндрическим волноводом и фильтром типов волн. Катод заземлен, а на анод подается высоковольтный импульс положительной полярности. Вследствие малой длительности импульса напряжения (~ 60 нс) магнетрон эффективно работал только с внешним подвозбуждением (см.табл.3.1). Авторы этого прибора отмечают его перспективность для длинноимпульсной гене-

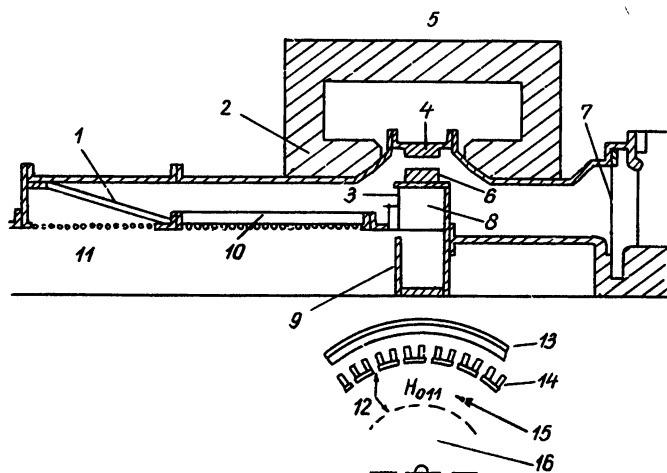


Рис.3.14. Гибридный обращенный коаксиальный релятивистский магнетрон [92-94]:

1 - изолирующий стержень; 2 - полюсный наконечник; 3 - настроечный поршень; 4 - катод; 5 - магнит; 6 - анод; 7 - источник питания; 8 - НОII-резонатор; 9 - трансформатор связи; 10 - фильтр типов волн; 11 - спиральный волновод; 12 - щели связи; 13 - катод; 14 - ЗС; 15 - НОII-резонатор; 16 - резонаторная секция выходного волновода

рации, но, несмотря на упомянутые проекты с увеличением длительности модулирующего импульса до 400 нс и в будущем до 1 мкс, результаты экспериментов пока не опубликованы.

Кроме уже отмеченных достоинств, описанная конструкция снижает вероятность развития высокочастотного пробоя как в ЗС, так и в выводе мощности за счет существенного увеличения числа резонаторов и щелей связи. Однако в экспериментах с 3-см обращенным коаксиальным релятивистским магнетроном [100], проведенных при микросекундной длительности импульса напряжения, наблюдались следы высокочастотных пробоев на щелях связи ЗС с цилиндрическим стабилизирующим резонатором, торце стабилизирующего резонатора и диафрагме, связывающей стабилизирующий резонатор с фильтром типов волн. Возможно, именно этим объясняется сравнительно низкий ($\sim 5\%$) КПД. Тем не менее зарегистрирован уровень мощности ~ 100 МВт при длительности СВЧ-импульса 0,7 мкс.

Обращенные релятивистские магнетроны без стабилизирующих резонаторов исследованы также в работах [95, 96, 98, 99, 101] (см. рис.3.8). Эксперименты проводились в 10-см диапазоне в нано- и микросекундных длительностях импульса. Основной проблемой был эффективный вывод генерируемой мощности. В работе [95] описано устройство вывода мощности, выполненное с использованием двух симметрично расположенных относительно анодного блока прямоугольных волноводов, связанных щелями связи, прорезанными в катode, с пространством взаимодействия. Наличие азимутально дрейфующих слоев катодной плазмы и электронного облака между ЗС и щелями связи определяет низкую эффективность такого устройства [95] и ограничение длительности СВЧ-импульса [98, 101]. Вывод мощности

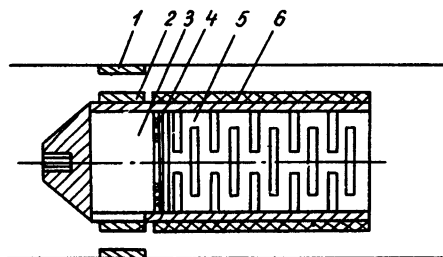


Рис.3.15. Конструкция обращенного коаксиального релятивистского магнетрона 3-см диапазона:
1 - катод; 2 - ЗС; 3 - стабилизирующий резонатор; 4 - диафрагма; 5 - фильтр типов волн; 6 - поглотитель

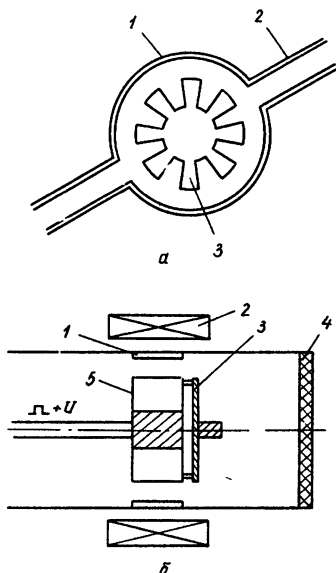


Рис.3.16. Обращенный релятивистский магнетрон:
а) вывод мощности "бок" [95]: 1 - катод, покрытый графитом; 2 - выходной волновод; 3 - ЗС;
б) аксиальный вывод мощности на волне Е₀₁ [98, 99, 101]: 1 - катод; 2 - соленоид; 3 - антенна Е₀₁; 4 - выходное окно; 5 - ЗС

"вперед" по оси магнетрона с использованием трансформирующих устройств, связывающих замедляющую систему с H_{01} - [94, 98, 99, I_{01}] или H_{01} -модой [98, I_{01}] цилиндрического выходного волновода, свободен от указанных недостатков, однако требует дальнейших работ по оптимизации.

Характерной особенностью практически всех экспериментов с обращенными магнетронами является наличие так называемого токового резонанса, т.е. роста тока в магнетроне в области синхронных магнитных полей. Это явление обычно для классических магнетронов, но в экспериментах с релятивистскими наблюдалось впервые. Видимо, причиной является отсутствие аксиальных токов в обращенных магнетронах.

Зависимость мощности СВЧ-излучения от величины анодного напряжения в обращенном магнетроне имеет линейно нарастающий характер, причем длительность СВЧ-импульса с ростом его мощности сокращается (см. табл.3.1). Связано это с увеличением анодного тока на поверхности ЗС и соответственным уменьшением времени образования анодного плазменного слоя.

Релятивистский магнетрон является одним из немногих приборов релятивистской высокочастотной электроники, уже нашедших практическое применение. Эти приборы использованы в качестве источников мощного СВЧ-излучения в экспериментах по рассеянию электромагнитной волны на сильноточном электронном пучке [I_{02}], в испытаниях радиоэлектронной аппаратуры [I_{03}], для предварительного возбуждения и фазовой синхронизации виркаторов [$5I$] и накачки мощных газовых лазеров [I_{04}].

В заключение этой части обзора следует упомянуть, что магнетрон на сегодняшний день является не единственным представителем релятивистских приборов со скрещенными полями. Экспериментально и теоретически (см. работу [I_{05}] и приведенную в ней литературу) исследуются касптроны - приборы, в которых вращающийся в скрещенных полях (собственном электрическом и внешнем магнитном) электронный слой взаимодействует с ЗС на гармониках циклотронной частоты, а также лазеры на свободных электронах со скрещенными полями - так называемый магнетрон с гофрированным полем, в котором к скрещенным (радикальному электрическому и аксиальному магнитному) полям добавлено азимутально-периодическое магнитное поле, образуемое системой постоянных магнитов, расположенных на коаксиальных аноде и катоде. Основная цель этих работ - продвижение в коротковолновый диапазон.

В последнее время появились публикации, свидетельствующие о возможности эффективной генерации в магнитоизолированных коаксиальных линиях, причем необходимое для изоляции и синхронизма азимутальное магнитное поле создается непосредственно самим сильноточным электронным пучком, распространяющимся в зазоре между внутренним (потенциальным) и внешним электродами линии [I_{06} , I_{07}]. В этих конструкциях снимается проблема создания внешнего магнитного поля, немаловажная для магнетрона.

4. РЕЛЯТИВИСТСКИЕ УСТРОЙСТВА КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

4.1. Релятивистские устройства с диэлектрическими замедляющими системами

Идея использования диэлектрических ЗС для преобразования энергии электронного пучка в электромагнитное излучение была выдвинута еще в 1947 г. В.М. Гинзбургом [I12].

В работе [I13] впервые была рассмотрена неустойчивость электронного пстока, распространяющегося в волноводе, заполненном диэлектриком. В 50–60-е годы проводилось большое количество теоретических и экспериментальных исследований черенковского излучения в СВЧ-диапазоне [I5, I14–I19]. К достоинствам диэлектрических структур следует отнести максимальную простоту их изготовления и высокую электрическую прочность, что особенно важно при освоении коротковолновой области длин волн – миллиметровой и субмиллиметровой.

Однако до последнего времени эти исследования дальнейшего развития не получили. Дело в том, что даже для самых высоковольтных электронных пучков, имевшихся в то время у экспериментаторов, скорости электронов были таковы, что для получения черенковского излучения нужно было значительное замедление волны. В этом случае вся энергия замедленной волны сосредоточена внутри диэлектрика, а пучок для его эффективного взаимодействия с волной необходимо проводить на конечном расстоянии от поверхности диэлектрика. Поэтому связь волны с пучком при этом оказывалась слишком мала. Что же касается пучков с релятивистскими энергиями, существовавших в то время, то они имели очень низкую интенсивность, так что возможно было наблюдать только лишь маломощное спонтанное излучение.

Положение изменилось с развитием техники сильноточных импульсных ускорителей. Для пучков со скоростями, близкими к скорости света, нужно небольшое замедление волны, поэтому можно использовать материалы с небольшим значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon \sim 2+4$), и характерный масштаб локализации поля вблизи поверхности диэлектрика становится уже порядка длины волны, а для ультрарелятивистских пучков растет пропорционально энергии. Впервые об эксперименте по генерации электромагнитного излучения сильноточным релятивистским пучком в волноводе, частично заполненном диэлектриком, указано в работе [I20]. В это же время начали развиваться исследования по освоению все более коротковолнового диапазона (миллиметрового и субмиллиметрового) на базе субрелятивистских (100+200 кэВ) относительно слаботочных (I+40 А) пучков, формируемых в импульсных источниках с термокатодом [I21–I25].

Было получено СВЧ-излучение в основном в миллиметровом диапазоне, а в работах [I26–I28] сообщается о приборах, работающих в инфракрасном диапазоне.

Следует заметить, что в зарубежной литературе устройства, основанные на вынужденном черенковском излучении, в которых для замедления волны служит однородный вдоль направления движения электронного потока изотропный и бездисперсный диэлектрик, получили название "черенковский мазер (лазер)".

Излучение при взаимодействии потока электронов с полем диэлектрической ЗС может быть обусловлено различными физическими механизмами: черенковское излучение или излучение при рассеянии волны накачки на пучке в волноводе [129].

Вместе с тем при транспортировке сильноточных релятивистских электронных пучков в сильном магнитном поле возможно также вынужденное магнитотормозное излучение (МТР) в условиях нормального и аномального эффектов Доплера [130, 131]. Поэтому электродинамическая система в виде волновода с частичным диэлектрическим заполнением применяется не только в черенковских приборах, но и в циклотронных, где присутствие диэлектрика ведет к увеличению полосы усиления (МТР на нормальном эффекте Доплера [132], МТР на аномальном эффекте Доплера [131, 133]), и в приборах убитронного типа [121, 134].

Черенковский лазер, электродинамическая структура которого представляет собой металлический волновод с диэлектрической втулкой, изготовленной из нитрида бора, исследуется в работе [125]. Во всех экспериментах диэлектрическая втулка имела одинаковую толщину, равную 0,5 мм. Радиус втулок изменялся в пределах 0,195±0,25 см. Была исследована зависимость генерируемой мощности и частоты от ускоряющего напряжения и тока. Показано, что с увеличением энергии частиц уменьшалась частота генерации. При питающем напряжении 180 кВ, токе в импульсе ~10 кА выходная мощность прибора составила ~100 кВт при длительности импульса 0,5±0,7 мкс, частота излучения ~88 ГГц. КПД неоптимизированного исследуемого генератора равен 1±10 %.

В работе [135] приведены результаты экспериментов по генерации миллиметрового излучения в волноводе, также частично заполненном диэлектриком, при энергии электронов 400 кэВ < E < 1,0 МэВ и токе в импульсе 60±150 А. В качестве диэлектрика использовался полиэтилен с $\epsilon = 2$. Электродинамическая структура исследуемого прибора представляла собой проводящую трубку диаметром 2,1 см, в которой помещались диэлектрические втулки толщиной 0,25 мм, длиной 35 и 50 см и внутренним радиусом 1 и 1,75 мм соответственно. В этом устройстве на частоте 150 ГГц получено излучение мощностью 500 кВт и на частоте 310 ГГц – мощностью 10 кВт. Экспериментально проверена зависимость частоты излучения от энергии пучка электронов и диаметра диэлектрической втулки, рабочий тип волны E_{01} (рис.4.1).

Сравнительно недавно появилось сообщение об исследованиях, проведенных уже при более высоком напряжении и токе [136]. Так, при токе в импульсе ~100 А и напряжении ~1,0 МВ получена максимальная мощность ~200 кВт на длине волны ~950 мкм. Замедляющие системы – прямоугольные волноводы сечением 1,5 x 10 мм² и 1,1 x 10 мм², широкие стенки которых покрыты диэлектрической пленкой с малыми потерями ($\epsilon = 2,12$).

В работах [125, 135, 136] исследования по получению коротковолнового излучения в генераторах с диэлектрическими ЗС проведены с током 100±150 А. Большой интерес представляют и эксперименты, проведенные на сильноточных пучках, где токи составляют единицы килоампер. В этом случае удалось существенно увеличить уровень генерируемой мощности. В работе [137] описано устройство, представляющее собой медный волновод диаметром 50 и длиной 600 мм с текстолитовыми или полиэтиленовыми втулками. Текстолитовая втулка имеет

диаметр 30, полиэтиленовая – 40 мм. Трубчатый пучок электронов формировался магнитоизолированным коаксиальным диодом, диаметр потока составляет 22, 30 и 36 мм. Основные результаты, полученные при исследовании прибора, приведены в табл.4.1. Были рассмотрены оба механизма генерации: черенковский и МЦР на аномальном эффекте Доплера (МЦРАД). Зависимость мощности излучения от величины напряженности ведущего магнитного поля показана на рис.4.2.

В пользу магнитотормозного излучения на аномальном эффекте Доплера говорит наличие приращения поперечного импульса электронов, измеренного по методике, описанной в работе [138]. Так, средний угол наклона вектора скорости электронов пучка в отсутствие диэлектрической втулки не превышает 5° , тогда как с диэлектрической втулкой из текстолита он составляет 12° . Зарегистрирована мощность ~ 90 МВт на длине волны 7,5 мм для МЦРАД и ~ 80 МВт в диапазоне 7+10 мм для черенковского механизма регенерации.

Результаты экспериментального исследования мощной ЛБВ приведены в работе [139]. Генератор представляет собой медный волновод диаметром 50 и длиной 1200 мм, в который помещен диэлектрический цилиндр из текстолита ($\epsilon = 3,67$, $\lambda = 3$ см) длиной 800 и внутренним диаметром 30 мм (рис.4.3). Источником электронов служит сильноточный ускоритель. Параметры пучка: энергия ~ 650 кэВ, ток в импульсе 6,5 кА. Зазор между электронным потоком и диэлектрической вставкой ~ 2 мм. Полоса генерируемых частот 2,75+3,3 см. Выходная мощность 580 МВт, длительность импульса излучения на уровне 0,5–60 нс, КПД $\sim 15\%$.

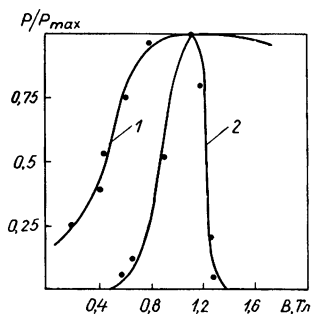


Рис.4.2. Зависимость мощности излучения от внешнего магнитного поля:
1 – черенковский механизм генерации; 2 – МЦРАД

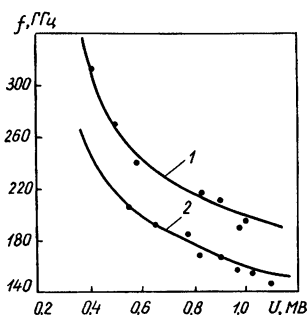


Рис.4.1. Зависимость частоты излучения от энергии электронов:
1 – радиус диэлектрической втулки $r = 1$ мм, толщина $a = 0,25$ мм, длина $L = 35$ см;
2 – $r = 1,75$ мм, $a = 0,25$ мм, $L = 50$ см

Таким образом, полученные результаты позволяют рассматривать генераторы с диэлектрическими ЗС как альтернативу другим, в настоящее время более разработанным приборам на

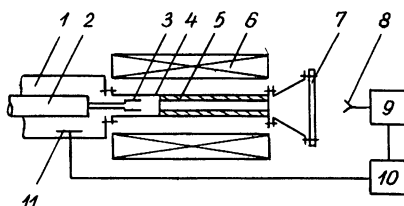


Рис.4.3. Схема ЛБВ с диэлектрической ЗС:
1 – электронная пушка; 2 – катододержатель; 3 – катод; 4 – волновод; 5 – диэлектрическая втулка; 6 – соленоид; 7 – передающая антенна; 8 – приемная антенна; 9 – детектор на горячих носителях; 10 – осциллограф; 11 – делитель напряжения

Результаты, полученные при исследовании генератора с диэлектрическими ЗС [137]

Механизм излучения	Материал диэлектрика	Размер втулки, мм	Параметр пучка	Расстояние от пучка до структуры, мм	Мощность излучения, МВт	Тип волны	Длина волны, мм
МЦРАД	Текстолит	$\phi 30, \phi 50$ $\ell = 330$	1 MB 2,5 кА	4	20	-	12
"	"	$\phi 30, \phi 50$ $\ell = 120$	1 MB 2,5 кА	4	6	-	12
"	"	$\phi 30, \phi 50$ $\ell = 450$	1 MB 2,5 кА	4	8	-	12
"	Полиэтилен	$\phi 40, \phi 50$ $\ell = 400$	1,5 MB 2,5 кА	5	5	-	7,5
"	"	$\phi 40, \phi 50$ $\ell = 400$	1,5 MB 5 кА	5	30	H ₁₂	7,5
"	"	$\phi 40, \phi 50$ $\ell = 400$	1,5 MB 8 кА	5	90	H ₁₂	7,5
МЦРАД + черенковский	Текстолит	$\phi 30, \phi 50$ $\ell = 330$	0,9+1,5 MB 2,5+5 кА	3	-	-	12 10+12
Черенковский	Полиэтилен	$\phi 40, \phi 50$ $\ell = 400$	1+1,6 MB 16+6 кА	2	80	E ₀₂	7+10

сильноточных пучках [140-142] при освоении гигаваттных уровней мощности, в особенности в коротковолновом диапазоне длин волн.

Для создания высокоэффективных сверхмощных приборов с диэлектрическими ЗС необходимо исследовать ряд явлений, существенных при использовании в них сильноточных электронных потоков (10^3 - 10^4 А). Сюда следует отнести взаимодействие сильноточных электронных пучков с электромагнитными полями, влияние собственных статических полей на параметры потока в области взаимодействия, возможность взаимодействия пучка электронов с большим числом волноводных мод в пространственно развитых электродинамических структурах и т.д.

4.2. Мощные СВЧ-приборы с сверхразмерными электродинамическими структурами

Известно, что при генерации СВЧ-импульсов с помощью сильноточного релятивистского электронного пучка электрическая прочность электродинамической структуры является одним из основных факторов, ограничивающих длительность генерируемого импульса. Во всех известных экспериментах по генерации, проведенных с сильноточными пучками микросекундной длительности на приборах различного типа (магнетрон, ЛОВ, многоволновый черенковский генератор, триод), СВЧ-импульс значительно короче импульса напряжения [30, 33, 34, 46, 70, 143, 144].

Для релятивистских пролетных черенковских приборов ограничение длительности импульса излучения связано с развитием СВЧ-пробоев на поверхности ЗС [145-149], в качестве которой используется диафрагмированный волновод. Согласно исследованиям, проведенным в работах [148, 149], видно, что физи-

ческий механизм ограничения длительности включает в себя следующие процессы. На стенке гофрированного волновода компонента электрического ВЧ-поля, параллельная силовой линии внешнего магнитного поля, инициирует развитие электронного разряда в пространстве между гофрами. Источником электронов для разряда могут служить либо плазма, возникающая в результате взрыва микронеоднородностей на поверхности структур, либо эмиссия электронов из-за наличия сильных электрических полей. Электронный разряд и плазма закорачивают ЗС, что приводит к ограничению мощности и срыву генерации. Подтверждением этому служит полученная зависимость длительности импульса от выходной мощности СВЧ-генератора [148-150].

В мощных генераторах, использующих диафрагмированные волноводы, величина напряженности аксиального электрического ВЧ-поля на поверхности достигает больших величин. Так, например, в слабогофрированных волноводах (такие структуры как раз и применяются в мощных релятивистских приборах) при мощности 300 МВт она составляет 300+600 кВ/см [149-152].

Весьма перспективным с точки зрения энергетики генерируемого СВЧ-импульса [3] может стать переход к пространственно развитым электронным потокам и пространственно развитым секционированным электродинамическим структурам. При этом желательно использовать механизм взаимодействия электронного пучка с объемными волнами, многоволновый механизм и направленное излучение релятивистских частиц в выходных секциях генераторов.

В работах [153-155] описаны многоволновые черенковские генераторы, рассчитанные на взаимодействие пучка с волной вблизи $\mathcal{X}$ -вида колебаний, содержащие две секции сверхразмерного диафрагмированного волновода с одинаковыми периодами, разделенные трубой дрейфа. Анализируются структуры с различным отношением диаметра волновода к генерируемой длине волны $D/\lambda = 3+5$. При $D/\lambda = 5$, энергии электронов ~ 2 МэВ и импульсном токе ~ 15 кА выходная мощность генератора в 3-м волноводе составляла ~ 15 ГВт при КПД $\sim 50\%$.

Сильноточные релятивистские электронные пучки нашли свое применение и для генерации мощных СВЧ-колебаний миллиметрового диапазона в генераторах дифракционного излучения (ГДИ). В этих приборах также используются пространственно развитые электродинамические структуры. Так, уже в первой реализации ГДИ была получена мощность в несколько десятков мегаватт [156]. Излучение в электродинамической структуре генератора дифракционного излучения, представляющей собой периодический диафрагмированный волновод, служит примемом генерации объемных волн, при этом сдвиг фаз волн электромагнитного поля на ячейку периодического волновода близок к $2\mathcal{X}$ ($2\mathcal{X}$ -вид колебаний). Основное преимущество таких генераторов, работающих на объемных волнах, по сравнению с многоволновыми черенковскими приборами, где синхронизм электронного пучка идет на поверхностной волне вблизи частот $\mathcal{X}$ -вида, состоит в более равномерном распределении электромагнитного поля в рабочем объеме структур. Это позволяет, как показали эксперименты, уменьшить напряженность электрической составляющей ВЧ-поля у стенок структуры и тем самым увеличить уровень выходной мощности и длительность импульса СВЧ-излучения.

Исследован генератор дифракционного излучения в 8-мм диапазоне [157, 158]. Сверхразмерность электродинамических структур, равная $D/\lambda \sim 10$, позволила существенно увеличить уровень выходной мощности генератора. Тонкий

трубчатый электронный поток толщиной $\sim 2+3$ мм создавался кольцевым катодом и формировался в диоде с магнитной изоляцией. Поток формировался внешним магнитным полем $\sim 2,5$ Тл. Внешний диаметр потока менялся в пределах $78+82$ мм. Ток пучка регулировался от 10 до 30 кА при энергии электронов $750+950$ кэВ. Исследуемая система имела следующие размеры: внутренний диаметр волновода 90 мм, диаметр диафрагм 86 мм, период структуры 7 мм, толщина диафрагм $1+5$ мм. В 8-мм диапазоне взаимодействие медленной волны электронного потока происходило с полями различных мод на частоте 2π -вида. Наибольшая импульсная мощность ~ 400 МВт получена при внешнем диаметре потока 78 мм и его энергии ~ 950 кэВ, длительность импульса излучения $\sim 60+80$ нс, генерируемая длина волны ~ 8 мм.

Сотрудниками ИСЭ СО АН СССР также исследован мощный генератор СВЧ-излучения миллиметрового диапазона вблизи частот 2π -вида [159]. Остановимся кратко на результатах этого эксперимента, схема которого показана на рис.4.4.

Работы по исследованию генератора проводились на сильноточном ускорителе. Трубчатый электронный поток формировался в коаксиальном магнитоизолированном диоде, на который подавался импульс высокого напряжения амплитудой ~ 2 МВ и длительностью ~ 1 мкс. Магнитное поле в эксперименте создавалось соленоидом и изменялось в пределах $1,5+3$ Тл, ток пучка составлял $10+17$ кА.

Электродинамическая система генератора состояла из двух отрезков дифрактированного волновода (диафрагмы выполнены в виде полуторов) с внутренним диаметром 118 мм и периодом 4 мм, разделенных гладкой трубой дрейфа (см. рис.4.4). В результате исследования дифракционного генератора получена мощность излучения ~ 1 ГВт на длине волны около 5 мм при длительности импульса $\sim 0,7$ мкс.

Как видно из приведенных примеров (многоволновый черенковский генератор, генератор дифракционного излучения), проблема ограничения длительности СВЧ-импульса в этих приборах не решена, хотя применение сверхразмерных структур в них и позволило значительно увеличить выходную мощность излучения. Дальнейшее увеличение поперечных размеров электродинамических структур связано с определенными трудностями в создании значительных магнитных полей в больших объемах и при работе на поверхностных волнах несущественно снижает напряженность поля у стенок структуры.

Другой способ решения задачи устранения локальных перенапряжений заключается в переходе к быстрым объемным волнам. Их аксиальная составляющая электрического поля у стенок структуры равна нулю. Такие волны существуют в гладких электродинамических структурах, поперечное сечение которых постоянно вдоль продольной оси системы. В связи с этим представляют интерес исследования [160],

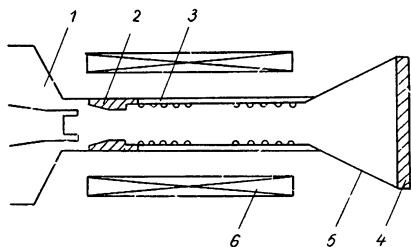


Рис.4.4. Схема мощного генератора дифракционного излучения 8-мм диапазона: 1 - магнитоизолированный диод; 2 - диафрагма; 3 - электродинамическая структура; 4 - вакуумно-плотное окно; 5 - выходной рупор; 6 - соленоид

где рассматривается взаимодействие сильнооточного релятивистского электронного потока с полем равномерно изогнутого волновода постоянного поперечного сечения.

Электродинамическая структура (рис.4.5) представляет собой волновод постоянного поперечного сечения, изогнутого равномерно так, что центральная линия волновода образует цилиндрическую спираль. Трубочатый пучок электронов распространяется соосно этой спирали. Такая гладкая электродинамическая структура, очевидно, также окажется перспективной с точки зрения получения мощных СВЧ-импульсов микросекундной длительности. Кроме того, как свидетельствуют исследования, при обеспечении доминирующего взаимодействия трубочатого электронного потока с какой-либо основной волноводной модой подавляются трансформационные колебания амплитуды поля этой волноводной моды, т.е. электронный поток способен стабилизировать поперечную структуру поля в таком волноводе. В частности, было выявлено, что интенсивность взаимодействия для каждой из волноводных мод носит резонансный характер в зависимости от радиуса трубочатого электронного пучка и радиуса спирали центральной линии волновода. Это позволяет надеяться на возможность селекции волноводной моды и, следовательно, перестройки частоты СВЧ-генератора выбором радиуса электронного пучка.

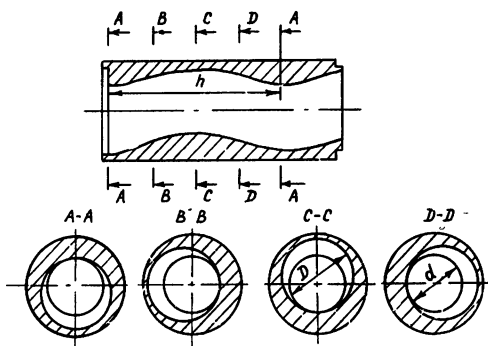


Рис.4.5. Электродинамическая структура

Первые исследования работ ЛБВ с такой электродинамической структурой показали работоспособность и возможность перестройки частоты генератора в диапазоне 10+3 см [161]. Равномерно изогнутый волновод имел следующие размеры: период спирали $T = 148$ мм, диаметр волновода $D_g = 137$ мм, диаметр пролетного отверстия $d = 105$ мм, длина $L = 740$ мм. Энергия электронов составляла $\sim 0,9+1,0$ МэВ, ток в пучке $7+10$ кА, длительность импульса по основанию ~ 80 нс. Напряженность магнитного поля была ограничена величиной 0,7 Тл, что обусловлено возможностями использованного соленоида.

Исследовалось возбуждение такого волновода трубочатыми электронными пучками диаметром 30, 56 и 86 мм. Выбранные диаметры пучка соответствовали максимуму усиления для волн E_{03} , E_{02} , E_{01} .

Для диаметра пучка 30 мм наблюдалась генерация на длинах волн $\lambda = 2,33$ см мощностью 100 МВт и $\lambda = 10,7$ см мощностью ~ 200 МВт, что соответствует взаимодействию пучка с волнами E_{03} и E_{01} . Во втором случае, для диаметра пучка 56 мм, зарегистрировано излучение мощностью ~ 500 МВт на длине волны $\lambda = 4,2$ см, соответствующей моде E_{02} . Для диаметра пучка 86 мм получена генерация на длине волны $\lambda = 2,7$ см (мода E_{03}) мощностью ~ 20 МВт. Малый уровень мощности объясняется неоптимальным значением сопротивления связи для волн E_{03} .

Приведенные результаты экспериментальных исследований релятивистского генератора позволяют сделать следующие выводы. Частота излучения определяется рабочим типом колебаний. Селекция волн может осуществляться путем подбора радиуса трубчатого электронного потока, соответствующего оптимальному значению сопротивления связи для данного типа колебаний. Полученные в эксперименте небольшие для данного класса приборов значения КПД (1+10 %) обусловлены неоптимальностью длины пространства взаимодействия.

5. РЕЛЯТИВИСТСКИЕ СВЧ-ПРИБОРЫ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Описанные выше СВЧ-устройства работают в основном в генераторном режиме и не могут пока применяться для нужд ускорительной техники. В последние годы при создании новых ускорительных установок используются сверхмощные усилительные многорезонаторные клистроны, которые обладают необходимыми для такого применения параметрами: высокой мощностью, большим усилением, высоким КПД, долговечностью и т.д. Кроме того, продолжается поиск новых способов генерации мощного СВЧ-излучения. Для питания современных ускорительных систем требуются СВЧ-приборы дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн. В длинноволновом диапазоне разработаны такие приборы, как гирокон, магникон и клистрод, а в сантиметровом диапазоне продолжаются работы по повышению уровня мощности многорезонаторных клистронов и созданию мощных гируклистронов [2,3].

Для большинства применений ускорителей требуются СВЧ-приборы, работающие как в импульсном (до 10 мкс), так и в непрерывном режиме. Это предопределило разработку приборов непрерывного действия (гироконов, магниконов, клистронов, клистронов) в основном в длинноволновой области СВЧ-спектра. Для нагрева плазмы в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу требуются приборы, работающие в непрерывном режиме на частоте ~ 8 ГГц и в миллиметровом диапазоне длин волн ($\lambda \sim 1$ мм). В связи с разработкой и проектированием суперколлайдеров на энергии 1+2 ТэВ (ШАА) и ускорителей на встречных линейных электрон-позитронных пучках (ВЭПП) на энергии 1000 x 1000 ТэВ (СССР) начаты работы по созданию релятивистских многорезонаторных клистронов с выходной мощностью 200+500 МВт в диапазоне 2+3 см при длительности импульса до 0,5 мкс [2].

Кроме того, для совершенствования ускорительной техники продолжаются исследования по созданию клистронов с выходной мощностью свыше 50 МВт в сантиметровом диапазоне длин волн (10,5 и 3,5 см).

Поэтому в этом разделе остановимся на особенностях приборов с динамическим управлением электронным потоком, какими являются гирокон и магникон, разработанные в ИЯФ СО АН СССР [4,5], на гибриде триод-клистрон, названном клистродом, и на релятивистских многорезонаторных клистромах.

5.1. Гирокон и магникон

Аналогично двухрезонаторному клистроу электродинамическая система гирокона [141] содержит входной резонатор, область дрейфа и выходной резонатор, в котором происходит торможение электронов и отбор энергии (рис.5.1).

Однако, в отличие от клистрона, в гироконе электронный поток модулируется не по величине скорости, а по ее направлению с помощью круговой развертки пучка. Электроны, отклоняясь от оси прибора, поступают в выходной резонатор, непрерывно меняя место влета в него. Таким образом происходит возбуждение СВЧ-колебаний в резонаторе непрерывным пучком без предварительного разбиения на сгустки.

Такой способ возбуждения резонатора использовался ранее при описании клистронов с поперечным отклонением в нерелятивистской электронике. Но для получения мощных СВЧ-колебаний при нерелятивистском уровне энергии электронов этот способ оказался мало эффективным. При релятивистских энергиях возможно формирование электронного потока в виде длинного, слабо расходящегося электронного пучка большой мощности. При малых поперечных размерах пучка практически все электроны одинаково эффективно тормозятся в выходном резонаторе гирокона. Эффект искривления траекторий релятивистских электронов в магнитном поле выходного резонатора гирокона компенсируется введением дополнительных магнитных полей.

Электронный пучок, создаваемый высоковольтным ускорителем (см. рис.5.1), проходит по оси резонатора развертки, в котором создается вращающееся высокочастотное электромагнитное поле. Под действием этого поля электроны, изменяя свою прямолинейную траекторию, образуют поверхность, близкую к конической. Электроны на ней расположены в форме раскручивающейся спирали. В пространстве дрейфа электроны отходят от оси прибора и попадают в щель выходного резонатора. В выходном резонаторе электроны возбуждают бегущую волну, поле которой осуществляет их торможение. СВЧ-мощность выводится через два или несколько волноводов, расположение которых не нарушает режим бегущей волны.

Для повышения электрической прочности в гироконе в качестве системы развертки используется один цилиндрический резонатор с вращающимся магнитным полем в зоне, где проходит электронный пучок (рис.5.2). Два вывода, разнесенные по азимуту на четверть окружности, запитываются от источника СВЧ-мощности со сдвигом фаз на 90° , что обеспечивает круговую поляризацию магнитного поля на оси резонатора.

Для компенсации искривления траекторий электронов магнитным полем волны в пролетном зазоре выходного резонатора используется постоянный магнит.

Другим способом компенсации искривления траекторий магнитным полем бегущей волны является ввод электронов в выходной резонатор по радиусу, а не параллельно оси прибора. Электроны, введенные с начальной азимутальной скоростью, к концу торможения движутся по радиусам и могут передать СВЧ-полю

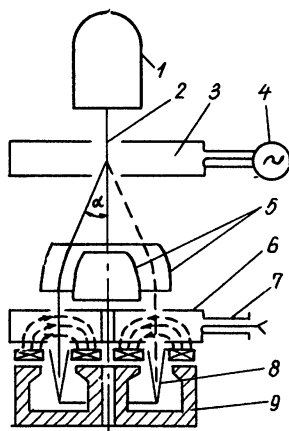


Рис.5.1. Конструктивная схема аксиального гирокона: 1 - высоковольтный ускоритель; 2 - электронный пучок; 3 - резонатор развертки; 4 - ВЧ-возбудитель; 5 - электростатическая отклоняющая система; 6 - выходной резонатор; 7 - выводы энергии; 8 - коллектор; 9 - компенсирующий электромагнит (α - угол статического магнитного поля)

всю свою кинетическую энергию. Для этих целей после резонатора развертки устанавливается коническая катушка, создающая постоянное магнитное поле, расходящееся по радиусам вблизи вершины конуса (рис.5.3). Электроны, описывая в этом поле траектории двойной кривизны, не только переходят в плоскость оси гирокона, но и приобретают дополнительную азимутальную скорость в направлении движения волны, бегущей в выходном резонаторе.

На гироконах возможно получение значительных уровней выходной мощности в импульсном и непрерывном режимах работы (табл.5.1). Как видно из таблицы, возможности гироконов весьма широки, но из-за большой напряженности электрического поля в выходном резонаторе наиболее перспективной областью их применения является дециметровый диапазон длин волн. При продвижении в коротковолновую область в гироконах проявятся все особенности, свойственные традиционным мощным СВЧ-приборам. Кроме того, малость динамического диапазона ограничивает их использование только как энергетического прибора. Высокие ускоряющие напряжения представляют также значительные трудности с точки зрения их практической реализации с учетом радиационной безопасности.

Первые же разработки гироконов выявили их преимущества и недостатки. Так, на импульсном гироконе при энергии электронов 320 кэВ и длительности импульса 20 мкс была получена импульсная мощность 600 кВт с КПД 90 % на частоте 430 МГц. Для питания накопителя ВЭП-4 разработан гирокон на 200 МВт импульсной мощности при ускоряющем напряжении 2 МВ, длительностью импульса 10 мкс, с частотой повторения 1 Гц в том же диапазоне длин волн. Получена мощность в нагрузку 40 МВт при КПД 85 % и ускоряющем напряжении 1,4 МВ. Был

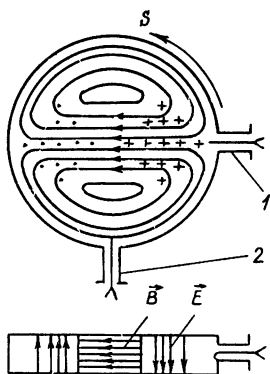


Рис.5.2. Резонатор развертки: 1,2 - вводы мощности; S - направление вращения поля; B - линии магнитной индукции; E - линии напряженности электрического поля

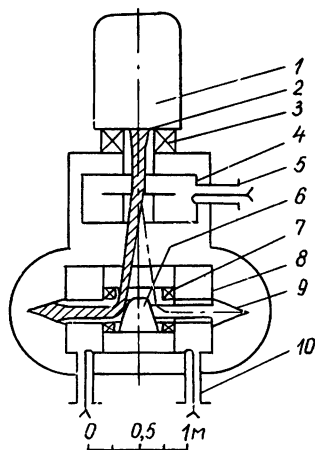


Рис.5.3. Конструкция радиального гирокона непрерывного действия метрового диапазона длин волн: 1 - источник релятивистских электронов; 2 - электронный пучок; 3 - 1-я магнитная линза; 4 - резонатор развертки; 5 - ввод мощности; 6 - магнитостатическая отклоняющая система; 7 - 2-я магнитная линза; 8 - выходной резонатор; 9 - коллектор; 10 - вывод энергии

разработан также гирокон непрерывного действия с проектными параметрами: выходная мощность 5 МВт, ускоряющее напряжение 500 кВ, длина волны 1,65 м, КПД 80 %. При энергии электронов 200 кэВ получена мощность в нагрузку 400 кВт при полном КПД 75 %.

Таблица 5.1

Характеристики гироконов и магникона

Гироконы

U_0 , кВ	$P_{\text{вых}}$, МВт	$\lambda = 1,65 \text{ м}$		$\lambda = 0,7 \text{ м}$		$\lambda = 0,3 \text{ м}$	
		E^* , МВ/м	η	E^* , МВ/м	η	E^* , МВ/м	η
500	8	1,65	0,91	2,9	0,91	9,0	0,89
1000	70	2,7	0,93	6,3	0,93	15	0,93
1500	270	3,7	0,94	8,4	0,94	20	0,94
2000	720	4,7	0,95	11	0,94	26	0,94
3000	3000	6,6	0,95	16	0,95	36	0,95

Магникон

f , МГц	U_0 , кВ	I_0 , А	$P_{\text{вых}}$, МВт	τ , мкс	η_e , %	η , %	$K_{\text{ус}}$, дБ
915	300	12	26	30	85	73	30

* E – напряженность электрического поля в выходном резонаторе.

Таким образом, доработка и совершенствование гироконов позволит иметь мощные СВЧ-источники для ускорительной техники. Возможности применения гироконов в других областях техники ограничены также их узкополосностью. Однако они могут найти широкое применение в СВЧ-энергетике.

Как отмечалось выше, одной из основных проблем в мощных и сверхмощных приборах является высокая напряженность электрического поля в выходных системах этих приборов. В гироконах по мере продвижения в коротковолновый диапазон длин волн напряженность электрического поля превышает 100 кВ/см, а это приводит к падению КПД до 60 % (скажем, для гирокона с длиной волны 30 см и выходной мощностью 1 МВт).

Для того чтобы облегчить решение проблем, возникающих при создании прибора на большие мощности и высокие частоты, в ИЯФ СО АН СССР был предложен и реализован гирокон с магнитным сопровождением, названный магниконом [5].

Устройство магникона схематически изображено на рис.5.4. Непрерывный электронный пучок из источника электронов попадает в устройство круговой развертки, где отклоняется вращающимся магнитным полем на угол α_0 . В пространстве дрейфа электроны отходят от оси и попадают в стационарное магнитное поле, создаваемое соленоидом, где происходит преобразование скорости электронов из продольной в поперечную, и, непрерывно меняя точку (азимут) своего входа в выходной резонатор, возбуждают в нем бегущую по азимуту волну (колебания $E_{\perp}(t)$) и отдают ей свою энергию. Если циклотронная частота Ω близка к частоте ω , на которой производится развертка и на которую настроен выходной резонатор, а направление циклотронного вращения совпадает с

направлением вращения пучка при развертке, то эффективное взаимодействие может длиться много периодов ВЧ-колебаний. Большая длина выходного резонатора приводит к существенному уменьшению напряженности СВЧ-поля, омических потерь в стенках и удельного тепловыделения. Большие отверстия для пучка в центре торцевых стенок резонатора (диаметр около двух ларморовских диаметров) в сочетании с магнитным сопровождением практически снимают проблему токопрохождения.

Передача энергии частиц электромагнитному полю в выходном резонаторе магнотрона определяется балансом сил, обусловленных действием электрического E и магнитного B_1 полей (рис.5.5). При торможении электрона, вращающегося в однородном магнитном поле сопроваждения вокруг оси резонатора, если $E_z = -\omega r B_1$, а $v_1 = \Omega r = \omega r$, то $F_z = e[E_z + v_1 B_1] = 0$. Таким образом, в процессе взаимодействия происходит переход поперечной скорости v_1 в продольную, а торможение электронов происходит за счет уменьшения v_1 при сохранении продольного импульса. Траектория электрона в резонаторе имеет вид спирали уменьшающегося диаметра.

В 1985 г. в ИЯФ СО АН СССР введен в действие магнотрон на частоту 915 МГц при длительности импульса 50 мкс [5]. Результаты исследования магнотрона приведены в табл.5.1, а его конструктивная схема - на рис.5.6. Магнотрон показал хорошие эксплуатационные характеристики. Планируется создание аналогичных устройств на длины волны 10+30 и 3+5 см с выходной мощностью 5+10 и 500+1000 МВт соответственно, поскольку расчетные напряженности электрического поля ($E < 50$ кВ/см) и удельного тепловыделения ($P_s < 50$ Вт/см²) не превышают допустимых значений для приборов непрерывного режима [5]. В табл.5.2 представлены сравнительные характеристики мощных многорезонаторных клистронов, работающих на накопителях заряженных частиц, и магнотрона [5]. Сравнение показывает, что параметры магнотрона по мощности и КПД превосходят параметры соответствующих клистронов, однако существенным недостатком магнотрона является более высокое напряжение питания.

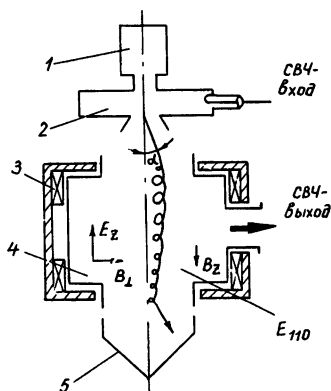


Рис.5.4. Схема устройства магнотрона: 1 - источник электронов; 2 - резонатор развертки; 3 - соленоид; 4 - выходной резонатор; 5 - коллектор

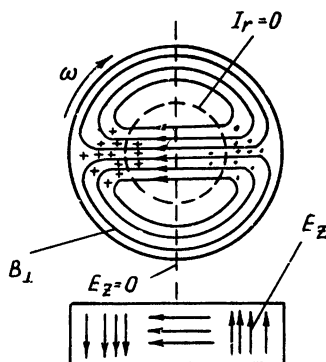


Рис.5.5. Электромагнитные поля в резонаторах магнотрона

Таблица 5.2

Сравнение параметров мощных много-
резонаторных клистронов и магникро-
на, разработанных для ускорителей

Параметр	УК 1350 (LEP)	УК 1303 (TRISTAN)	УК 1250 (PETRA)	Магникро- (не- прерыв- ный), проект
λ , см	80	60	30	30
$P_{\text{вых}}$, МВт	1,1	1	0,4	2,8
η , %	68	64	60	78
η_e , %	69	66	63	85
U_0 , кВ	90	90	60	300
$K_{\text{ус}}$, дБ	41	42	43	35
$P_{\text{сол}}/P$, %	0,2	0,4	1,0	0,6

5.2. Клистрод

В длинноволновом диапазоне, кроме ги-
рокона и магникрона, обычно используются
СВЧ-тетроды и многорезонаторные клистроны.
Однако в этом случае клистроны имеют зна-
чительные размеры и их применение стано-
вится проблематичным, а СВЧ-тетроды имеют
значительный уровень мощности, но невысо-
кий КПД. Эти особенности диапазона привели
к созданию мощного высокоэффективного ком-
пактного СВЧ-прибора, сочетающего в себе
свойства клистрона и тетрода и названного
клистродом [6,7]. В клистроде (рис.5.7)
электроны, эмитируемые с катода, модули-
руются сеткой в первичном резонаторе и,
сгруппировавшись, попадают в выходной ре-
зонатор, где происходит преобразование
энергии электронного потока в излучение.

Для усиления широкополосного сигнала имеется широкополосное входное устрой-
ство, представляющее собой перестраиваемый резонатор, а в выходном резонато-
ре встроена регулируемая щель связи. На рис.5.8 приведена зависимость КПД и
усиления клистронов X2250 и X2251, работающих в диапазоне 200+800 МГц и
имеющих киловаттный уровень выходной мощности. Наиболее мощный непрерывный
усилительный клистрод X2259 дает выходную мощность 1 МВт на частоте 450 МГц
при ускоряющем напряжении 120 кВ и токе 11 А. В данном приборе КПД составля-
ет 75 % и усиление около 25 дБ.

Разработки клистронов начались сравнительно недавно и можно надеяться,
что дальнейшее их совершенствование приведет к созданию более мощных и ком-
пактных СВЧ-приборов, работающих в телевидении и ускорительной технике.

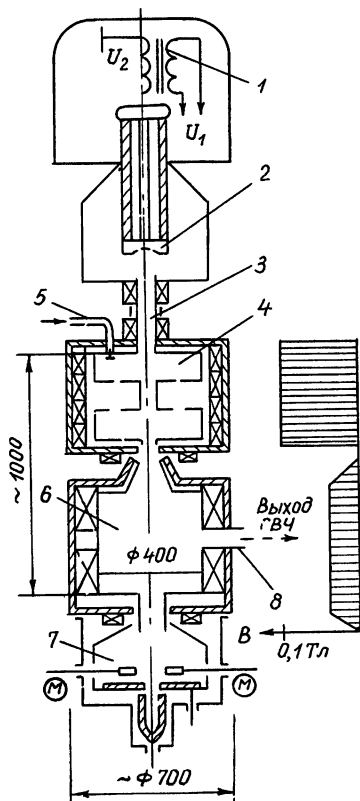


Рис.5.6. Конструктивная схема
магникрона:

1 - импульсный трансформатор;
2 - диодная пушка; 3 - электрон-
но-оптический канал; 4 - резона-
тор круговой развертки; 5 - в-
мостный ввод; 6 - выходной ре-
зонатор; 7 - коллектор; 8 - выход
СВЧ-мощности

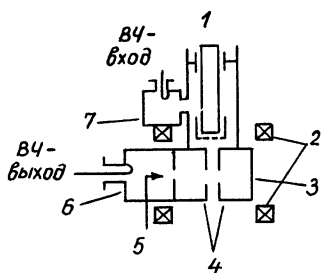


Рис.5.7. Схема клистрода [6] :
1 - высоковольтный источник; 2 - фокусирующие катушки; 3, 6 - выходной резонатор; 4 - коллектор; 5 - регулируемая щель связи; 7 - широкополосное входное устройство

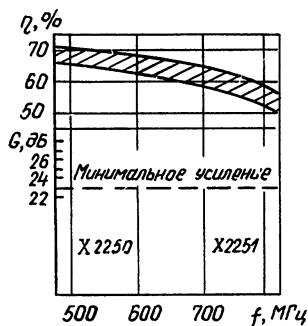


Рис.5.8. Зависимость КПД η и усиления G от частоты для клистронов с выходной мощностью 3+30 кВт [7]

5.3. Релятивистские многорезонаторные клистроны

Как уже говорилось, для создания линейных ускорителей и коллайдеров на энергию заряженных частиц 0,5+2 ТэВ требуется импульсная СВЧ-мощность гигаваттного уровня. Из описанных выше приборов пока ни один не дает такого уровня мощности, а самым мощным пока является суперклистрон, разработанный в SLAC на 150 МВт при длительности импульса 2 мкс и частоту 2,9 ГГц. Обнадеживающим является то обстоятельство, что акт ускорения в линейном ускорителе происходит за короткий промежуток времени (порядка 100 нс), а линейные размеры как ускорителя, так и прибора могут быть уменьшены переходом к более коротким длинам волн генерации [162-167]. Однако при этом все равно необходимо повышать ускоряющее напряжение и ток пучка. Здесь следует обратить внимание на эксперимент, проведенный в 1970 г. на релятивистском многорезонаторном клистроне (рис.5.9) с выходной СВЧ-мощностью 1 ГВт, работавшем на синхротронном ускорителе с параметрами электронного пучка 2 МВ и током 1 кА при длительности импульса 15 нс. На этом устройстве была лишь зафиксирована мощность 1 ГВт, но после этого прибор вышел из строя и больше эксперименты на нем не проводились. Этот эксперимент дает основание рассматривать релятивистские многорезонаторные клистроны как один из возможных вариантов для реализации новых ускорителей [162-164].

Однако, как отмечалось, увеличение ускоряющего напряжения в многорезонаторных клистроны при переходе в релятивистскую область связано с увеличением, с одной стороны, длины устройства пропорционально γ_o^2 . А с другой стороны, увеличение тока пучка приводит к снижению эффективности клистронов, но несколько сокращает длину прибора. Переход на более высокие частоты по сравнению с существующими приборами в ускорительной технике также приводит к сокращению длины прибора [2].

Остановимся на некоторых физических особенностях, проявляющихся при реализации релятивистских многорезонаторных клистронов [168-183]. При уве-

личении ускоряющего напряжения меняется характер модуляции и группирования электронного потока. Модуляция по скоростям становится несимметричной и приводит к снижению эффективности группирования электронов в сгустки. Несимметричность модуляции может быть уменьшена при снижении амплитуд напряжений на зазорах резонаторов при их отстройке от основной частоты. Уменьшение амплитуд напряжений на резонаторах предпочтительно и с точки зрения уменьшения напряженности электрического поля на зазорах и ухода от электрического пробоя. При сохранении относительных значений длин труб дрейфа физические процессы при группировании будут аналогичны процессам в слабoreлятивистском потоке, но при образовании сгустков появляются особенности, связанные с уменьшением радиуса действия кулоновских сил: их действие будет локализовано вблизи электронного уплотнения. Если поток фокусируется сильным продольным магнитным полем, то электроны, находящиеся на периферии пучка, будут двигаться по кинематическим траекториям, а движение центра сгустка будет в большой степени определяться действием сил пространственного заряда. В то же время при конечных фокусирующих полях и неоднородности потока по сечению влияние кулоновских сил приведет к заметному радиальному движению периферийных электронов и двумерные эффекты будут играть существенную роль. Аналогичная ситуация уже отмечалась при рассмотрении процессов в слабoreлятивистских клистронах с высоким КПД [3, 168].

Поскольку в мощных слабoreлятивистских многорезонаторных клистронах максимальный уровень КПД (свыше 80 %) достигается при малых значениях микропервеанса (рис.5.10), то соответственно и в релятивистской области высокоэффективные клистроны могут быть созданы при малых эквивалентных микропервеансах [168]. На рис.5.11 приведена зависимость тока пучка I_0 от ускоряющего напряжения U_0 для трех областей эквивалентного микропервеанса $P_{\mu\text{э}}$, вычисленного с учетом релятивистских поправок:

$$P_{\mu\text{э}} = P_{\mu} \frac{2\sqrt{2} \gamma_0^2}{(\gamma_0 + 1)^{3/2}}.$$

Поскольку микропервеанс является характеристикой ЭОС, рассмотрим возможность реализации приведенных на рис.5.11 значений токов и напряжений. Электронные потоки, формируемые термоэмиссионными пушками с плотностью эмиссии 10 А/см^2 , могут быть сплошными или кольцевыми с параметрами: ток до 1 кА при напряжении до 1+2 МВ. Получение больших значений токов и напряжений возможно на электронных пушках, работающих на эффекте взрывной эмиссии и реализуемых на ускорителях прямого действия, либо на линейных индукционных уско-

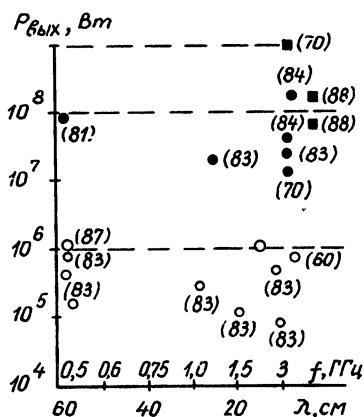


Рис.5.9. Зависимость выходной мощности от длины волны для мощных многорезонаторных клистронов импульсного (●) и непрерывного (○) режимов работы (■ - релятивистские клистроны) [168]

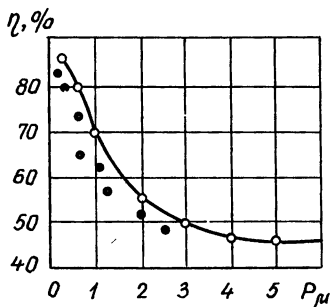


Рис.5.I0. Зависимость теоретического (○) и экспериментального (●) значений КПД η от микропервеанса P_μ [168]

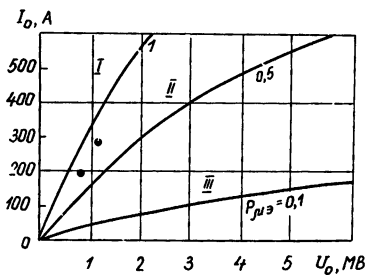


Рис.5.II. Зависимость тока электронного пучка от ускоряющего напряжения при различных значениях микропервеанса [164]: ● - экспериментальные данные [193]

рителях. Здесь следует сделать несколько замечаний. При данных значениях токов и напряжений в основном реализуется импульсный режим работы с последовательным по мере увеличения напряжения укорочением длительности импульса. Описанные выше параметры реализуются при длительностях импульса от 1 мкс до 100 нс.

При формировании электронных потсков взрывозмиссионными пушками важное значение для реализации клистронов на таких потоках является качество пучка. Поскольку при релятивистских параметрах практически не удается реализовать однородные по сечению потоки, то применяются специальные устройства для улучшения качества пучка, например эмиттансные фильтры и т.д.

Укорочение длительности импульса, естественно, ставит вопрос об эффективности возбуждения резонаторов электродинамической системы. Однако можно показать, что колебания в резонаторе будут устанавливаться при соответственном укорочении длины волны генерируемого излучения. Поскольку трубы дрейфа в многорезонаторных клистронах должны быть запредельными, то длина волны излучения связана с радиусом трубы дрейфа соотношением $\lambda = 2,61R$, где R - радиус трубы дрейфа. А это, в свою очередь, означает, что возникает необходимость в малых каналах проводить большие токи пучка. Одним из возможных решений проблемы является переход на пространственное развитие электронного потока (рис.5.I2). Однако в этом случае на первый план выдвигаются вопросы

фокусировки таких потоков. Для релятивистских клистронов использование пространственно развитых пучков с большим числом потоков и малым значением микропервеанса (до 0,5) является наиболее целесообразным и оправданным, поскольку в этом случае можно устранять обратную связь между резонаторами и транспортировать электронные потоки практически без потерь.

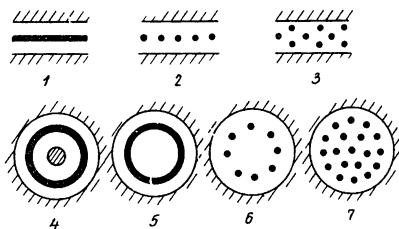


Рис.5.I2. Пространственно-развитие потока

Килоамперные потоки, формируемые сильноточными электронными ускорителями, в основном кольцевые, и вопросы транспортировки таких пучков весьма сложны. Одной из реализаций релятивистского клистрона на таких пучках при высокой энергии электронов и при соблюдении требования малого значения микропереванса может служить система концентрических резонаторов, нанизанная на кольцевой или пространственно-развитой электронный пучок с максимальным использованием пространства в таком потоке, с компенсацией возбуждения азимутальных мод структуры.

При энергии электронов до 3 МэВ и токе до 1 кА могут быть сформированы сплошные электронные потоки малого диаметра, что позволит создать релятивистские клистроны в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн, но, естественно, при длительности импульса до 1 мкс.

Однако наибольшая сложность при реализации релятивистских устройств заключена в системе отбора энергии в выходной системе. Особенностью релятивистских клистронов является то обстоятельство, что выходная система должна быть принципиально распределенной. Это связано с тем, что для реализации высокоэффективного группирования относительная амплитуда напряжения на выходной системе порядка $I, I+1, 2$ и при высоких ускоряющих напряжениях необходимо иметь распределенную выходную систему с малым значением добротности и распределенную систему отбора энергии (в зависимости от уровня мощности) из ячеек выходной структуры [168, 170, 172–174, 177, 178]. По этим соображениям в качестве выходной системы релятивистского клистрона могут быть двухзазорные либо многозазорные резонаторы, система связанных резонаторов, диафрагменная линия и т.д.

Таким образом, в области I (см. рис.5.II) ($P_{\mu\epsilon} > 1$) могут быть реализованы релятивистские клистроны как на взрывозмиссионных, так и на термоэмиссионных катодах, однако эффективность таких устройств не будет превышать 50 %. Повышение КПД возможно за счет пространственного развития электронного потока (см. рис.5.I2) при распределении тока в поперечном сечении, что значительно снижает провисание потенциала и действие сил пространственного заряда.

В области II (см. рис.5.II), где $P_{\mu\epsilon}$ лежит в интервале $0,5+1$ и которая может быть обеспечена термоэмиссионными пушками со сплошным либо пространственно-развитым потоком, а также взрывозмиссионными катодами со сплошным потоком, электронный КПД релятивистских клистронов составит 50+60 %.

Область III ($P_{\mu\epsilon} = 0, I+0,5$) – наиболее предпочтительна для реализации эффективности релятивистских клистронов на уровне 70+80 % с такими же потоками, как в области II.

Эксперименты с релятивистскими клистронами в СССР были проведены в 1985 г. совместно сотрудниками НИИЯФ (при ТПИ) и МГУ на ускорителе "Дуга" [183]. Клистрон состоял из четырех группирующих однозазорных резонаторов и распределенной выходной системы [180, 181]. Для фокусировки электронного пучка была специально разработана импульсная фокусирующая система, обеспечивающая магнитное поле с напряженностью до 3,5 кГс и неоднородностью менее 5 % при общей длине 1,5 м [182]. Эксперименты проводились при ускоряющем напряжении ~400 кВ и токе пучка ~700 А при длительности импульса 1+2 нс. Получено усиление входного сигнала 26 дБ при выходной мощности ~1 МВт на

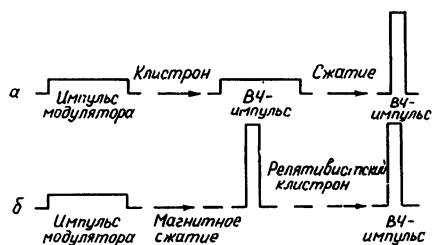


Рис.5.13. Возможные схемы реализации высоких уровней импульсной выходной мощности

При реализации высоких уровней выходной мощности для ускорителей возможны две схемы построения (рис.5.13). В первом случае импульс модулятора проходит через клистрон, формирующий мощный ВЧ-импульс, мощность из которого увеличивается за счет сжатия импульса до 100 нс. Во второй схеме мощный импульс от модулятора за счет магнитного сжатия до 100 нс формирует мегавольтный килоамперный пучок, поступающий на вход релятивистского клистрона, на выходе которого формируется мощный ВЧ-импульс [165, 166].

Создание мощных релятивистских потоков, формируемых термоэмиссионными электронными пушками, проводится в ИЯФ СО АН СССР для создания мощного СВЧ-прибора для ВЛЭП [185-192]. Планируется создать релятивистский многорезонаторный клистрон с выходной мощностью 100+200 МВт на длину волны 2 см при длительности импульса 0,5 мкс.

Эксперименты на релятивистском клистроне были проведены в 1987-1988 гг. Станфордским ускорительным центром (SLAC) совместно с Национальной лабораторией в Ливерморе (LLNL) и Лабораторией им. Лоуренса в Беркли (LBL) на компактных сильноточных ускорителях, разработанных в LLNL [2, 193-196]. Параметры реализованных релятивистских клистронов приведены в табл.5.3, а схема одного из экспериментов дана на рис.5.14. Электронный пучок формировался либо в линейном индукционном инжекторе, содержащем термоэмиссионную пушку с последующим ускорением, либо в сильноточном линейном индукционном ускорителе с последующей фильтрацией пучка эмиттансным фильтром.

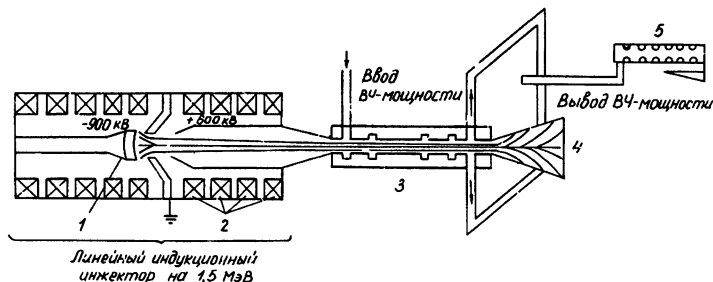


Рис.5.14. Схема экспериментальной установки:
1 - катод; 2 - ферритовые сердечники; 3 - релятивистский клистрон; 4 - коллектор; 5 - ускорительная секция [162]

длине волны излучения 10,5 см. Малый уровень мощности связан с неоптимальностью конструкции клистрона на данные параметры ускорителя, а также с особенностями формирования электронного потока взрывоэмиссионным катодом.

В аналогичных работах, начатых в 1987 г. в США [184], исследовалась возможность усиления сигнала в двухрезонаторном релятивистском клистроне.

Параметры реализованных релятивистских клистронов [194]

Клистрон	SL3	SHARK	SL4
Выходная частота, ГГц	8,57	11,4	11,4
Входная частота, ГГц	8,57	5,7	11,4
Выходная мощность, МВт:			
пиковая (макс.)	75	47	200
широкий импульс (макс.)	75	47	63
Расчетное усиление, дБ	54	20	65
Эффективность, %:			
расчетная	60	20	40
реализованная (макс.)	55	25	50
Ускоряющее напряжение, кВ:			
расчетное	330	1200	1200
рабочее (макс.)	1000	1200	1000
Ток пучка, А:			
расчетный	300	1000	1000
рабочий (макс.)	350	750	750
Число резонаторов	5	2	6
Длина прибора, см	31	25	98
Холодная добротность:			
входного резонатора	250	725	280
резонаторов линейного усиления	4000	-	120
промежуточного резонатора	4000	-	3800
выходного резонатора	44	40	20
Диаметр труб дрейфа, мм	11	19; 9,2	14; 9,2

Проведены эксперименты на трёх релятивистских клистронах, названных SL3, SL4 и SHARK. Клистрон SL3 представляет собой традиционный пятирезонаторный клистрон, сконструированный SLAC для ускорителя на ускоряющее напряжение 330 кВ и ток 300 А, на котором получена выходная мощность 30 МВт на длине волны 3,5 см при длительности импульса 2 мкс. Клистрон SL4 сконструирован на длину волны 2,6 см специально для экспериментов на линейном индукционном ускорителе, а SHARK представляет собой умножительный двухрезонаторный клистрон, в котором во входной резонатор заводится мощность на частоте 5,7 ГГц, а в выходном снимается на частоте 11,4 ГГц.

Остановимся кратко на результатах эксперимента. На рис.5.15 приведена зависимость выходной мощности клистрона SL3 от ускоряющего напряжения. Точками на экспериментальной кривой отмечены

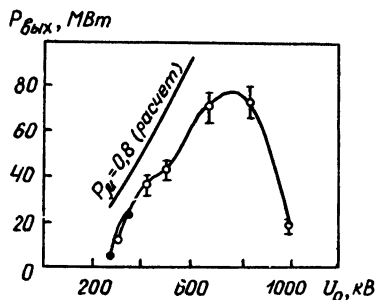


Рис.5.15. Зависимость выходной мощности клистрона SL3 от ускоряющего напряжения:
 • — эксперимент в SLAC
 ○ — эксперимент в LLNL [193]

ны результаты, полученные на приборе с термоэмиссионной пушкой, а кружочками на той же электродинамической системе, но с электронным пучком, формируемым линейным индукционным ускорителем. Видно, что замена одного способа формирования другим не привела к изменению результатов в области действия термоэмиссионной пушки, но позволила реализовать более высокий уровень выходной мощности (около 80 МВт) при более высоком ускоряющем напряжении электронного пучка и при длительности импульса, равной длительности импульса линейного индукционного ускорителя (30 нс). При этом на выходе прибора не наблюдалось электрического пробоя и паразитных колебаний.

Схема релятивистского клистрона SL4 представлена на рис.5.16. Во входной резонатор подводилась СВЧ-мощность около 300 Вт. Второй, третий и четвертый резонаторы вместе с первым составляют каскад линейного усиления сигнала, а пятый резонатор – каскад нелинейного группирователя. Выходной резонатор одноазорный. В клистроне реализовано изменение диаметра трубы дрейфа с 14 до 9 мм и получена выходная мощность 200 МВт при усилении 65 дБ и КПД 50 % (см. рис.5.11). Однако в данном клистроне при превышении определенного уровня тока пучка происходит сужение длительности импульса выходной СВЧ-мощности (рис.5.17). Механизм укорочения СВЧ-импульса связывают с влиянием нагрузки электронного пучка и пролетными эффектами. Зависимость выходной мощности релятивистского клистрона SL4 от входной мощности приведена на рис.5.18.

Схема умножительного релятивистского клистрона SHARK приведена на рис.5.19. В нем также реализовано изменение диаметра трубы дрейфа с 19 до 9,5 мм. Клистрон состоит из входного и выходного резонаторов. В данной конструкции клистрона предполагалось получение выходной мощности до 260 МВт, однако, так же как и в клистроне SL4, при увеличении тока пучка происходит срыв колебаний и ограничение длительности выходного СВЧ-импульса. Зависимость выходной СВЧ-мощности от тока пучка для клистрона SHARK представлена на рис.5.20. Для различных уровней мощности показана также деградация СВЧ-импульса. Обобщенные результаты исследований для всех трех клистронов приведены на рис.5.21.

Таким образом, первые эксперименты на релятивистских клистронов позволили реализовать значительные уровни выходной мощности до 200 МВт. На наш

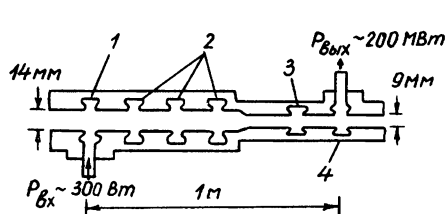


Рис.5.16. Схема релятивистского клистрона SL4 / I94 /:
1 — входной резонатор; 2 — резонаторы линейного усилителя; 3 — промежуточный резонатор; 4 — выходной резонатор

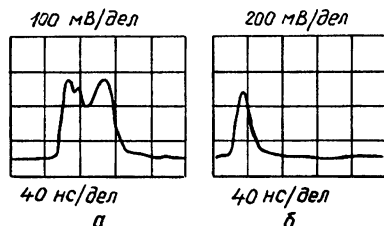


Рис.5.17. Длительности импульса при разных уровнях выходной мощности релятивистского клистрона SL4 ($U_0 = 930$ кВ, $f = 11,4$ ГГц) / I94 /:
а) $P_{\text{вых}} = 68$ МВт, $I_0 = 300$ А; $\sigma_0 = 1,4$ кГс; б) $P_{\text{вых}} = 202$ МВт, $I_0 = 420$ А; $\sigma_0 = 2$ кГс

взгляд, использование распределенных выходных систем в релятивистских клистронах позволит продвинуться на пути получения больших уровней мощности без ограничения длительности импульса СВЧ-излучения.

Рис.5.18.

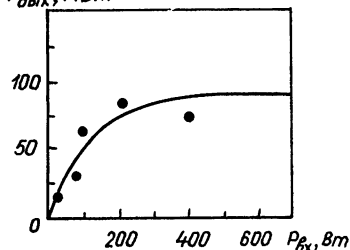


Рис.5.18. Зависимость выходной мощности релятивистского клистрона SL4 от входной мощности ($U_0 = 975$ кВ, $I_0 = 600$ А) [194]

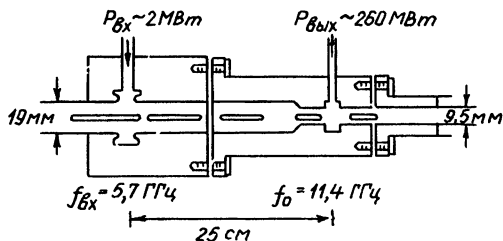


Рис.5.19. Схема релятивистского клистрона SHARK [194]

Рис.5.20.

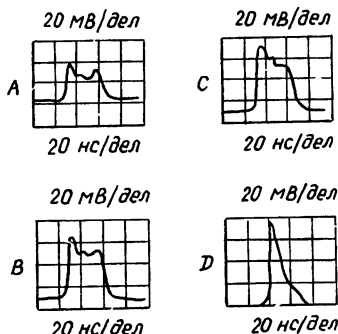
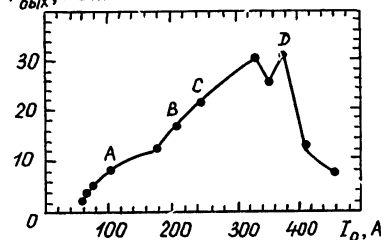


Рис.5.20. Зависимость выходной мощности релятивистского клистрона SHARK от тока электронного пучка и СВЧ-импульсы ($U_0 = 950$ кВ, $P_{вх} = 1,4$ МВт) [194]

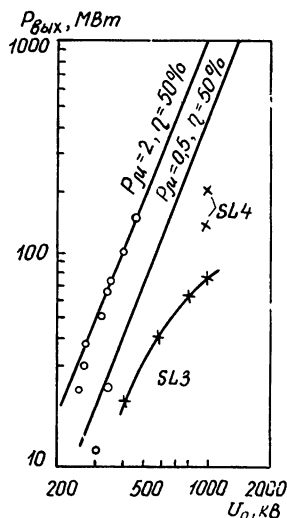


Рис.5.21. Зависимость выходной мощности от ускоряющего напряжения для релятивистских клистронов [194]

В настоящем обзоре мы остановились лишь на некоторых вопросах релятивистской СВЧ-электроники, рассмотрев, в основном, способы генерации и усиления когерентного излучения на устройствах с преимущественным продольным движением электронных потоков. В связи с тем, что большинство экспериментов по генерации СВЧ-излучения проводятся на сильнооточных электронных ускорителях, формирующих электронные пучки взрывоземиссионными катодами и работающих в монопериодном режиме, практическое использование релятивистских устройств сверхбольшой мощности требует дальнейшего совершенствования как техники формирования электронных потоков, так и схем ускорителей, на которых проводятся эксперименты. Вне зависимости от этого исследование физических принципов генерации сверхмощного излучения продолжают на существующих ускорительных системах, затрагивая, главным образом, проблемы освоения коротковолнового диапазона длин волн [197], и, на наш взгляд, в ближайшие годы можно ожидать значительного прогресса в данной области исследований. Параллельно с этими работами совершенствуются схемы сильнооточных ускорителей на пути перехода к работе в режиме повторения импульса и увеличения частоты следования импульсов.

Релятивистская СВЧ-электроника обеспечила значительный отрыв по уровню выходной мощности и частоте генераторов от генераторов традиционной СВЧ-электроники. Поэтому последовательное продвижение по мощности приборов с использованием технологии и техники традиционной СВЧ-электроники и физических принципов релятивистской СВЧ-электроники позволит создать новое поколение СВЧ-приборов в основном в коротковолновом диапазоне длин волн.

Кроме того, проводятся исследования как по созданию релятивистских СВЧ-усилителей, так и по разработке генераторов с синхронизацией по фазе и частоте от внешнего источника. Это последнее направление исследований позволяет надеяться на создание сверхмощных комплексов из нескольких параллельно работающих релятивистских генераторов. Представляет интерес и такой путь улучшения характеристик генерируемого излучения, как использование высокодобротных резонаторов в качестве накопителей СВЧ-энергии [198]. В этом случае возможно получение мощных импульсов излучения, стабилизированных не только по амплитуде и частоте, но и по фазе.

Однако уже в настоящее время релятивистские приборы рассматриваются в качестве базовых для нового поколения ускорительной техники, систем связи, радиолокации и оружия. Таким образом, в ближайшие годы можно ожидать выхода ряда устройств релятивистской СВЧ-электроники на путь практической реализации.

1. Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах / Пер. с англ. А.Н.Санда-лова. М., 1987.
2. Артюх И.Г., Камальдинова Г.Ш., Сандалов А.Н. Лазеры на свободных электронах: Обзоры по электронной технике. Сер. I, Электроника СВЧ. Ч. I. Вып. I9(I3I4). Ч. II. Вып. II(I38I). М., 1987-1988.
3. Канавец В.И., Сандалов А.Н. Релятивистские генераторы и усилители СВЧ-излучения / ВИНТИ // Итоги науки и техники. Сер. Электроника. Т. I7. М., 1985.
4. Гирокон / Э.И.Горникер, М.М.Карлинер, Е.В.Козырев и др. // Реляти-вистская высокочастотная электроника / ИФ АН СССР. Вып. I. Горький, 1979.
5. Магникон / М.М.Карлинер, Е.В.Козырев, И.Г.Макаров и др. // Реляти-вистская высокочастотная электроника / ИФ АН СССР. Вып. 5. Горький, 1988.
6. Preist D.H., Shrader M.B. The klystrode - an unusual transmitting tube with potential for UHF-TV // Proc. of IEEE. 1982. V. 70. No 11. P. 1318.
7. Shrader M.B., Preist D.H. Compact high efficiency light weight 200-800 MHz high power RF source // IEEE Trans. 1985. V. NS-32. No 5. P. 2751.
8. Tellerico P.J., Rankin J.E. The gyrokon, a high efficiency high power microwave amplifier // IEEE Trans. 1979. V. ED-26. No 10. P. 1559.
9. The gyrokon radio-frequency generator. LA-8537-SR (Sept. 1980), LA-9500-SR (Sept. 1982).
10. Hirschfield J.L., Granatstein V.L. The electron cyclotron maser. - A historical survey // IEEE Trans. 1977. V. MTT-25. No 6. P. 522.
11. Гапонов А.В., Петелин М.И., Купатов В.К. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в ВЧ-электронике // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9-10.
12. Гольденберг А.Л., Нусинович Г.С. Мощные коротковолновые гиротроны / ВИНТИ // Итоги науки и техники. Сер. Электроника. Т. I7. М., 1985.
13. Аликаев В.В. ВЧ- и СВЧ-методы нагрева плазмы / ВИНТИ // Итоги нау-ки и техники. Сер. Физика плазмы. Т. I. Ч. 2. М., 1981.
14. Гинзбург В.Л. Об излучении радиоволн и их поглощении в воздухе // Изв. АН СССР. Физика. 1947. Т. II. Ч. 2.
15. Миллиметровые и субмиллиметровые волны / Под ред. Р.Т.Мириманова. М., 1959.
16. Диденко А.Н. и др. Мощные электронные пучки и их применение. М., 1977.
17. Тернов И.М. и др. Синхротронное излучение и его применение. М., 1980.
18. Heislmaier H. de Santis C., Wilson N.J. State of the art of solid state and tube transmitters // Microwave J. 1983. October. P. 46, 48.
19. Faillon G., Bearzatto G. Very long pulse high power klystrons for FEL and their generating conditions // 4 th International Symposium on Gyrotron. Chengdu Inst. of Radio Engineering, 20 October 1987.

20. Huffman G., Boilard D., Stone D. Power limits for accelerator tubes from UHF to Ka-band // Proc. of the 1984 Linear Accel. Conf., May 7-11 1984. Lufthansa-Schulungszentrum Seeheim. FRG. P.180.
21. Experimental studies of microwave radiation in 10 cm band of intense relativistic electron beam / A.N.Didenko, A.G.Gerlitsin, V.I.Zelentsov e.a. // Proc. Int. Top. Conf. on Electron Beam Research and Technology. Albuquerque, 1975. V.2. P.424.
22. Barkhausen H., Kurz K. Die kürzesten, mit Vacuumröhren herstellbaren Wellen // Phys. Zeitschrift. 1920. B. 21. No 1. S.1.
23. High-power microwaves from a nonisochronic reflecting electron system / R.A.Manafey, P.Sprangle, J.Golden, C.A.Kapetanakis // Phys. Rev. Lett. 1977. V.39. No 13. P.843.
24. Microwave generation in the reflex triode / H.E.Brandt, F.Brombosky, H.B.Bruns, R.A.Kehs // Proc. 2nd Int. Top. Conf. on High-power Electron and Ion Beam. Ithaca. 1977. P.649.
25. Генерация мощного СВЧ-излучения релятивистским электронным пучком в триодной системе / А.Н.Диденко, Я.Е.Красик, С.Ф.Перелыгин, Г.П.Фоменко // Письма в ЖТФ. 1979. Т.5. Вып.6.
26. Генерация мощного СВЧ-излучения в триодной системе сильноточным пучком микросекундной длительности / А.Н.Диденко, А.Г.Жерлицын, А.С.Сулакшин и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т.9. Вып.24.
27. Generation of high power RF pulses in the magnetron and reflex triode systems / A.N.Didenko, G.P.Fomenko, I.Z.Gleizer e.a. // Proc. 3rd Int. Top. Conf. on High-Power Electron and Ion Beams. Novosibirsk. 1979. V.2. P.683.
28. Захаров В.В., Кузнецов С.И. Зависимость характеристик триодного СВЧ-генератора от формы эмитирующей поверхности катода / Томск. политехн. ин-т. 1988. Деп. в ВИНТИ 18.02.88.
29. Перестройка частоты под действием внешнего сигнала в триоде с виртуальным катодом / В.П.Григорьев, А.Г.Жерлицын, Т.В.Коваль и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т.14. Вып.12.
30. Релятивистские триодные СВЧ-генераторы / А.Н.Диденко, А.П.Арзин, А.Г.Жерлицын и др. // Релятивистская высокочастотная электроника / ИИФ АН СССР. Вып.4. Горький, 1984.
31. Привезенцев А.П., Филипенко Н.М., Фоменко Г.П. Нелинейная теория колебаний электронного потока в триодной системе с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 1985. Т.30. № 4.
32. Григорьев В.П., Диденко А.Н. К теории возбуждения электромагнитных колебаний в системах с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 1988. Т.33. № 2.
33. Жерлицын А.Г., Кузнецов С.И., Мельников Г.В. Влияние внешнего контура на процесс генерации в триоде с виртуальным катодом // Тез. УП Всесоюз. симпоз. по сильноточной электронике. Томск, 1988.
34. Богданкевич А.С., Рухадзе А.А. Устойчивость релятивистских электронных пучков в плазме и проблема критических токов // УФН. 1971. Т.103.
35. Coutsiias E.A., Sullivan D.J. Space-charged limit instabilities in electron beams // Phys. Rev. A. 1983. V.27. No 3. P.1535.

36. Burkhart S.C., Scarpetty R.D., Lundberg R.L. A virtual cathode reflex triode for high power microwave generation // J. Appl. Phys. 1985. V.58. No 1. P.28.
37. Observation of high-power millimeter wave emission from a virtual cathode / H.A.Davis, R.R.Bartsch, E.G.Sherwood e.a. // Proc. 10th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves. Lake Buena Vista. 1985.
38. Burkhart S.C. Multigigawatt microwave generation by use of a virtual cathode oscillator driven by a 1-2 MV electron beam // J. Appl. Phys. 1987. V.62. No 1. P.75.
39. A radially and axially extracted virtual cathode oscillator (vircator) / H.Sze, J.Benford, T.Young e.a. // IEEE Trans. 1985. V. PS-13. No 6. P.592.
40. Sze H., Benford J., Harteneck B. Dynamics of a virtual cathode oscillator driven by a pinched diode // Phys. Fluids. 1986. V.29. No 11. P.3873.
41. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. М., 1984.
42. Interaction of a vircator microwave generator with an enclosing resonant cavity / J.Benford, D.Price, H.Sze, D.Bromley // J. Appl. Phys. 1987. V.61. No 5. P.2089.
43. Operational features and microwave characteristics of the vircator II experiment / D.Price, D.Fittinghoff, J.Benford e.a. // IEEE Trans. 1988. V. PS-16. No 2. P.177.
44. Impulsion micro-ondes gigawatt en bande X. / I.M.Buzzi, H.I.Doucet, H.Lomoin e.a. // Le Journ. de Phys. Lett. 1978. V.39. No 2. P.15.
45. Генерация СВЧ-колебаний при формировании виртуального катода в сильноточном электронном пучке / А.Г.Жерлицын, С.И.Кузнецов, Г.В.Мельников, Г.П.Фоменко // ЖТФ. 1986. Т.56. Вып.7.
46. Gigawatt-level microwave bursts from a new type of virtual-cathode oscillator / H.A.Davis, R.R.Bartsch, T.J.T.Kwan e.a. // Phys. Rev. Lett. 1987. V.59. No 3. P.288.
47. Efficient, multi-gigawatt, narrow bandwidth operation of the reditron oscillator / H.A.Davis, R.D.Fulton, E.G.Sherwood, T.J.T.Kwan // Abstr. 7th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Karlsruhe. 1988. P.335.
48. Экспериментальное исследование влияния внешнего магнитного поля на генерацию СВЧ-колебаний в виркаторе / А.Г.Жерлицын, Г.В.Мельников, Г.П.Фоменко, В.И.Цветков // Тез. УП Всесоюз. симпоз. по сильноточной электронике. Томск, 1988.
49. Didenko A.N. e.a. Influence of external high frequency signal on generation in the virtual cathode // Abstr. 7th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Karlsruhe. 1988. P.338.
50. Fazio M.V., Noeberling R.F. A reflexing electron microwave amplifier for RF particle-accelerator applications // Proc. 6th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Kobe. 1986. P.569.
51. Priming and phase locking of high power vircators / H.Sze, D.Price, W.Woo, J.Benford // Abstr. 7th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Karlsruhe. 1988. P.328.

52. Преобразование в высокочастотное излучение энергии собственных квазистатических полей сильноточных релятивистских электронных пучков / И.И.Винтизенко, Н.Ф.Ковалев, А.С.Сулакшин и др. // Релятивистская высокочастотная электроника / ИФФ АН СССР. Вып.5. Горький, 1988.
53. Air force examines effects of microwaves on electronic systems // AW ST. 1987. V.217. No 23. P.85.
54. Магнетроны сантиметрового диапазона / Пер. с англ. под ред.С.А.Зусмановского. Т.1-2. М., 1950-1951.
55. Bekefi G., Orzechowski T. Giant microwave bursts emitted from a field-emission, relativistic electron beam magnetron // Phys. Rev. Lett. 1976. V.37. No 6. P.379.
56. Релятивистский магнетрон с дифракционным выводом электромагнитного излучения / Н.Ф.Ковалев, Б.Д.Кольчугин, В.Е.Нечаев и др. // Письма в ЖТФ. 1977. Т.3. Вып.20.
57. Исследование генерации мощных сверхвысокочастотных колебаний с помощью релятивистского магнетрона / А.Н.Диденко, А.С.Сулакшин, Г.П.Фоменко и др. // Письма в ЖТФ. 1978. Т.4. Вып.1.
58. Ott E., Lovelace R.V. Magnetic insulation and microwave generation // Appl. Phys. Lett. 1975. V.27. No 7. P.378.
59. Нечаев В.Е., Петелин М.И., Фукс М.И. О перспективах использования релятивистских электронных потоков в приборах магнетронного типа // Письма в ЖТФ. 1977. Т.3. Вып.15.
60. Релятивистский магнетрон / В.Е.Нечаев, А.С.Сулакшин, М.И.Фукс, Ю.Г.Штейн // Релятивистская высокочастотная электроника / ИФФ АН СССР. Вып.1. Горький, 1979.
61. Ballard W.F. A relativistic magnetron with thermionic cathode // Supr. Report. No 840. 1981. P.142.
62. Ballard W.P., Self S.A., Crawford F.W. Theoretical consideration for relativistic magnetrons // Int. J. Electronics. 1983. V.55. No 5. P.687.
63. Lovelace R.V., Young T.F.T. Relativistic Hartree conditions for magnetrons: theory and comparison with experiments // Phys. Fluids. 1985. V.28. No 8. P.2450.
64. High power relativistic magnetrons : experiments and simulation / A.Palevsky, G.Bekefi, A.T.Drobot e.a. // Proc. 3rd Int. Top. Conf. on High Power Electron and Ion Beams. Novosibirsk, 1979. V.2. P.759.
65. Palevsky A., Drobot A.T. Numerical simulation of the relativistic magnetron // Abstr. IEEE Int. Conf. on Plasma Science. Montreal. 1979. P.43.
66. High-power magnetron experiments and numerical simulation / A.Palevsky, G.Bekefi, A.T.Drobot e.a. // Proc. 4th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Palaiseau. 1981. P.25.
67. Захаров В.В., Фоменко Г.П., Черногалова Л.Ф. Выбор оптимальных параметров замедляющей системы релятивистского магнетрона // Тез. 4-го Всесоюз. семинара по релятивистской СВЧ-электронике / МГУ. М., 1984.
68. Chernogalova L.F., Fomenko G.P., Zakharov V.V. Optimization of resonance system of relativistic magnetron // Abstr. 7th Conf. on High-Power Particle Beams. Karlsruhe. 1988. P.330.

69. Palevsky A., Bekefi G. Microwave emission from pulsed, relativistic E-beam diodes. II. The multiresonator magnetron // *Phys. Fluids*. 1979. V.22. No 5. P.986.

70. Релятивистский магнетрон с импульсным напряжением микросекундной длительности / А.Н.Диденко, А.С.Сулакшин, Г.П.Фоменко и др. // *Письма в ЖТФ*. 1978. Т.4. Вып.14.

71. Ilic D.B., Self S.A., Crawford F.W. Development of a relativistic magnetron // *Proc. IEEE Int. Conf. on Plasma Science*. Monterey. 1978. P.286.

72. Релятивистский магнетрон с независимым возбуждением / А.Г.Жерлицын, Г.В.Мельников, А.С.Сулакшин, Ю.Г.Штейн // *ЖТФ*. 1979. № II.

73. Релятивистский сильноточный магнетрон / А.Н.Диденко, В.И.Зеленцов, Г.В.Мельников и др. // *Тр. НИИЯФ*. 1979. Вып.8.

74. Исследование релятивистского магнетрона в режиме автоколебаний и усиления / А.Г.Жерлицын, Г.В.Мельников, А.С.Сулакшин и др. // *Тез. 9-й Всесоюз. конф. по электронике СВЧ*. Киев, 1979.

75. A relativistic magnetron oscillator / W.P.Ballard, D.B.Ilic, S.A.Self, F.W.Crawford // *Abstr. IEEE Int. Conf. on Plasma Science*. Montreal, 1979. P.45.

76. Craig G., Pettibone J., Ensley D. A symmetrically loaded relativistic magnetron // *Abstr. IEEE Int. Conf. on Plasma Science*. Montreal. 1979. P.44.

77. Palevsky A., Bekefi G. A 1,5 MeV relativistic E-beam magnetron // *Abstr. IEEE Int. Conf. on Plasma Science*. Montreal, 1979. P.43.

78. Ограничение длительности СВЧ-излучения в сильноточном магнетроне / И.З.Глейзер, А.Н.Диденко, А.С.Сулакшин и др. // *Письма в ЖТФ*. 1980. Т.6. Вып.1.

79. Мощный релятивистский магнетрон с длиной волны 3 см / Н.Ф.Ковалев, Е.Г.Крастелев, М.И.Кузнецов и др. // *Письма в ЖТФ*. 1980. Т.6. Вып.8.

80. Ballard W.P., Self S.A., Crawford F.W. A relativistic magnetron with thermoionic cathode // *J. Appl. Phys.* 1982. V.53. No 11. P.7580.

81. Экспериментальные исследования разнорезонаторного сильноточного магнетрона / И.И.Винтизенко, А.С.Сулакшин, Л.Ф.Черногалова и др. // *Письма в ЖТФ*. 1983. Т.9. Вып.8.

82. Сулакшин А.С. Ограничение утечки электронного тока из пространства взаимодействия релятивистского магнетрона // *ЖТФ*. 1983. Т.53. № II.

83. Variations on the relativistic magnetron / J.Benford, H.Sze, T.S.T.Young e.a. // *IEEE Trans.* 1985. V. PS-13. No 6. P.538.

84. Progress in the relativistic magnetron / J.Benford, H.Sze, D.Bromley, B.Harteneck // *Proc. 6th Int. Conf. on High-Power Particle Beams*. Kobe, 1986. P.577.

85. Experimental investigations of the magnetically insulated diodes and microwave generation in the relativistic magnetrons / L.F.Chernogalova, G.P.Fomenko, M.I.Fuks e.a. // *Proc. 6th Int. Conf. on High-Power Particle Beams*. Kobe, 1986. P.573.

86. Релятивистский магнетрон, работающий в режиме пуга импульсов / В.В.Васильев, И.И.Винтизенко, А.Н.Диденко и др. // *Письма в ЖТФ*. 1987. Т.13. Вып.12.

87. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П. Измерение параметров СВЧ импульсов, генерируемых релятивистским магнетроном // Письма в ЖТФ. 1987. Т.13. Вып.22.
88. Operating characteristics of relativistic magnetron with washer cathode / H.Sze, B.Harteneck, J.Benford, T.S.T.Yung // IEEE Trans. 1987. V. PS-15. No 3. P.327.
89. Phelps D.A. First observations of rep-rate operation of high power relativistic microwave tube // Abstr. 7th Conf. on High-Power Particle Beams. Karlsruhe, 1988. P.321.
90. Phase-locking of relativistic magnetrons / J.Benford, H.Sze, W.Woo, R.R.Smith // Abstr. 7th Conf. on High-Power Particle Beams. Karlsruhe, 1988. P.327.
91. Pulse-periodic relativistic magnetron / A.N.Didenko, G.P.Fomenko, E.G.Furman e.a. // Abstr. 7th Conf. on High-Power Particle Beams. Karlsruhe, 1988. P.331.
92. A hybrid inverted magnetron to generate gigawatt levels of pulsed microwave power / W.M.Black, R.K.Parker, R.A.Tobin e.a. // Proc. Int. Electron Devices Meet. Washington, 1979. P.175.
93. An alternate approach to the design of high-power relativistic magnetron / R.K.Parker, W.M.Black, R.A.Tobin, G.Farney // Abstr. IEEE Int. Conf. on Plasma Science. Montreal, 1979. P.44.
94. A high power magnetron for air breakdown studies / W.M.Black, W.M.Bollen, R.A.Tobin e.a. // Proc. Int. Electron Devices Meet. Washington, 1980. P.180.
95. Close R.A., Palevsky A., Bekefi G. Radiation measurements from an inverted relativistic magnetron / J. Appl. Phys. 1983. V.54. No 7. P.4147.
96. Эрли Л.М., Беллард В.П., Рус Л.Д. Комплексный подход к диагностике источников интенсивных одиночных СВЧ-импульсов // Приборы для научных исследований. 1986. № 9.
97. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Цветков В.И. О работе обращенного коаксиального диода с магнитной изоляцией // Письма в ЖТФ. 1986. Т.12. Вып.8.
98. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Черногалова Л.Ф. Генерация СВЧ-излучения обращенным релятивистским магнетроном // Письма в ЖТФ. 1987. Т.13. Вып.10.
99. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С. О выводе СВЧ-излучения из обращенного магнетрона на волне H_{01} / Томск. политехн.ин-т. Деп. в ВИНТИ 14.08.87.
100. Обращенный коаксиальный магнетрон 3-см диапазона длин волн / И.И.Винтизенко, А.С.Сулакшин, Г.П.Фоменко, Л.Ф.Черногалова // Тез. УП Всесоюз. симпози. по сильноточной электронике. Ч.1. Томск, 1988.
101. Chernogalova L.F., Sulakshin A.S., Vintizenko I.I. Generation of RF pulses by inverted relativistic magnetron // Abstr. 7th Conf. on High-Power Particle Beams. Karlsruhe, 1988. P.329.
102. Экспериментальное исследование рассеяния электромагнитной волны на РЭП / А.Н.Диденко, А.Р.Борисов, А.Г.Жерлицын и др. // Письма в ЖТФ. 1981. Т.7. Вып.17.

103. Benford J. High-power microwave simulator development // Microwave J. 1987. V.30. No 12. P.97.
104. О накачке ультрафиолетовых газовых лазеров мощным импульсным излучением релятивистского СВЧ-генератора / А.Н.Диденко, А.М.Прохоров, В.Н.Слинько и др. // Докл. АН СССР. 1988. Т.300. № 6.
105. Bekefi G. Survey of physics research in microwave devices // Proc. Int. Electron Devices Meet. San Francisco. 1984. P.822.
106. Lemke R.W., Clark M.C. Theory and simulation of high power microwave generation in magnetically insulated transmission line oscillator // J. Appl. Phys. 1987. V.62. No 8. P.3436.
107. Estrin M., Phelps D.A. New concepts in crossed-field microwave tubes // Abstr. 7th Conf. on High-Power Particle Beams. Karlsruhe, 1988. P.322.
108. Operating modes of relativistic rising-sun and A6 magnetrons / T.A.Treado, W.O.Doggett, E.E.Thomas e.a. // IEEE Trans. 1988. V. PS-16. No 2. P.237.
109. Direct experimental observation of n-mode oscillation in a relativistic magnetron / R.R.Smith, H.Sze, B.Harteneek, J.Benford // IEEE Trans. 1988. V. PS-16. No 2. P.234.
110. Сильноточные импульсно-периодические ускорители электронов для генераторов СВЧ-излучения / А.С.Ельчанинов, Ф.Я.Загулов, С.Д.Коровин и др. // Релятивистская высокочастотная электроника / ИФ АН СССР. Вып.2. Горький, 1981.
111. Creedon J.M. e.a. The reflex switch. A new vacuum opening switch for use with magnetic energy store // J. Appl. Phys. 1985. V.57. No 5. P.389.
112. Гинзбург В.Л. Об использовании эффекта Черенкова для излучения радиоволн // Докл. АН СССР. 1947. Т.56. № 3.
113. Ахизер А.И., Файнберг Я.Ю. Медленные электромагнитные волны // УФН. 1951. Т.44. № 3.
114. Джелли Дж. Эффект Черенкова на сверхвысоких частотах // Зарубеж. радиоэлектроника. 1963. № 5.
115. Васильев Е.И. Электронный поток в волноводе, частично заполненном диэлектриком // Радиотехника и электроника. 1959. Т.4. № 3.
116. Юрьев В.И. Взаимодействие потока электронов с диэлектрической замедляющей структурой // Радиотехника и электроника. 1960. Т.5. № 9.
117. Ломизе Л.Г. Расчет черенковского излучателя в диапазоне СВЧ // Радиотехника и электроника. 1960. Т.5. № 5.
118. Исследование в миллиметровом диапазоне волноводных излучателей, возбуждаемых релятивистским электронным потоком / Ю.В.Анисимова, Г.А.Бернашевский, А.Н.Выставкин, Л.Г.Ломизе // Радиотехника и электроника. 1960. Т.5. № 6.
119. Ломизе Л.Г. Сравнительные характеристики черенковского и тормозного излучения в диапазоне коротких радиоволн // ЖТФ. 1961. Т.31. № 3.
120. Walsh J.E., Marshall T.C., Schlesinger S.P. Generation of coherent Cherenkov radiation with an intense relativistic electron beam // Phys. Fluids. 1977. V.20. No 4. P.709.

121. Cherenkov and Cherenkov-Raman masers: Experiments / K.L.Felch, K.O.Busby, R.W.Lagman, J.E.Walsh // Free electron generators coherent radiation. Office Nav. Res. Workshop. - Telluride, Colo. 1979. P.301.
122. Felch K.L. e.a. Cherenkov radiation in dielectric lined waveguides // Appl. Phys. Lett. 1981. V.38. No 8. P.601.
123. von Laven S. e.a. High-power Cherenkov maser oscillator // Appl. Phys. Lett. 1982. V.41. No 5. P.408.
124. Cherenkov maser / J.E.Walsh, E.Garate, R.W.Lagman, R.Cook // 7th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, Marseille, 14-18 Febr., 1983. P.127.
125. Cherenkov maser operation at lower-mm wavelengths / E.Garate, R.Cook, P.Heim e.a. // J. Appl. Phys. 1985. V.58. No 2. P.627.
126. Johnson B., Walsh J.E. Cherenkov infrared laser // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. 1985. V. A237. No 1-2. P.239.
127. Walsh J.E., Johnson B., Datolli G. e.a. Far-infrared Cherenkov lasers // 10th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves: Conf. Dig. Lake Buena Vista, Fla., Dec. 9-13, 1985. P.37.
128. Walsh J.E., Johnson B., Shaughnessy C. e.a. A 100 mcm Cherenkov laser experiment // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. 1986. V. A250. No 1-2. P.308.
129. Walsh J.E. Free electron generator coherent radiation // Lect. Office Nav. Res. Workshop, Telluride, Colo. 1979. P.255.
130. Циклотронные и синхротронные мазеры / Л.В.Братман, Н.С.Гинзбург, Г.С.Нусинович и др. // Релятивистская высокочастотная электроника / ИФЭ АН СССР. Вып. I. Горький, 1979.
131. Релятивистский циклотронный генератор на аномальном эффекте Доплера / С.Ю.Галузо, В.И.Канавец, А.И.Слепков, В.А.Плетюшкин // ЖТФ. 1982. Т.52.
132. Measurements of gain for slow cyclotron waves on an annular electron beam / H.Guo, L.Chen, H.Keren e.a. // Phys. Rev. Lett. 1982. V.49. No 10. P.730.
133. A slow-wave ECM with axial injection / R.B.Michie, D.Mitrovich, F.S.Feller e.a. // Proc. 5th Int. Conf. on High-Power Particle Beams, San Francisco, Calif., 12-14 Sept., 1983. P.580.
134. Cherenkov-Raman free electron lasers / J.E.Walsh, von S.Laven, J.Bragcum, R.W.Lagman // Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves: Conf. Dig. Miami Beach, Fla, Dec. 7-12, 1981. P. f.6.3./1.
135. Cherenkov maser operation at 1-2 mm wavelengths / E.R.Garate, S.Moustalsis, J.M.Bussi e.a. // Appl. Phys. Lett. 1986. V.48. No 20. P.1326
136. Cherenkov free electron laser operation from 375 to 1000 mcm / E.R.Garate, J.E.Walsh, C.Shaughnessy e.a. // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. 1987. V. A259. No 1. P.125.
137. Генерация коротковолнового излучения сильноточных РЭП в волноводах, нагруженных диэлектриком / А.Н.Диденко, А.Р.Борисов, Г.П.Фоменко и др. // Генераторы и усилители на релятивистских электронных потоках / Под ред. В.М.Лопухина. М., 1987.

138. Борисов А.Р., Жерлицын А.Г., Синебрюхов А.А. Измерение параметров траектории заряженных частиц сильноточных релятивистских электронных пучков // ПТЭ. 1984. № 4.

139. Экспериментальные исследования черенковского излучения сильноточных релятивистских электронных пучков / А.Н.Диденко, А.Р.Борисов, Г.П.Фоменко, Ю.Г.Штейн // Письма в ЖТФ. 1983. Т.9. Вып.1.

140. Релятивистские генераторы диапазона миллиметровых волн / В.Л.Братман, Г.Г.Денисов, С.Д.Коровин и др. // Релятивистская высокочастотная электроника / ИФФ АН СССР. Вып.4. Горький, 1984.

141. Братман В.Л., Денисов Г.Г., Офицеров М.М. Мазеры на циклотронном авторезонансе миллиметрового диапазона длин волн // Релятивистская высокочастотная электроника / ИФФ АН СССР. Вып.3. Горький, 1983.

142. Генераторы когерентного излучения на свободных электронах / Отв. ред. А.А.Рухадзе. М., 1983.

143. Исследование релятивистской лампы обратной волны / А.Н.Диденко, С.Ф.Перелыгин, Г.П.Фоменко и др. // Тез. Всесоюз. симпоз. по сильноточной импульсной электронике. Томск, 1978.

144. Разрушение релятивистского сильноточного электронного пучка при генерации мощных импульсов электромагнитного излучения / С.П.Бугаев, М.П.Дейчули, В.И.Канаев и др. // Радиотехника и электроника. 1984. Т.29. № 3.

145. Исследование генерации высокочастотного излучения в карсинотроне с релятивистским электронным пучком / Ю.Ф.Бондарь, С.И.Заворотный, А.Л.Ипатов и др. / ВИНТИ // Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы. Т.9. Вып.2. М., 1983.

146. Релятивистские черенковские генераторы с резонансными замедляющими структурами / А.Ф.Александров, А.М.Афонин, С.Ю.Галузо и др. // Релятивистская высокочастотная электроника / ИФФ АН СССР. Вып.2. Горький, 1981.

147. Ограничение длительности мощных импульсов СВЧ-излучения в релятивистском карсинотроне / А.С.Ельчанинов, Ф.Я.Загулов, С.Д.Коровин и др. // Письма в ЖТФ. 1981. Т.7. Вып.19.

148. Пристеночный вторично-эмиссионный СВЧ-разряд в электронике больших мощностей / А.Ф.Александров, Л.Г.Бляхман, С.Ю.Галузо, В.Е.Нечаев // Релятивистская высокочастотная электроника / ИФФ АН СССР. Вып.3. Горький, 1983.

149. СВЧ-пробой в релятивистском высокочастотном генераторе / А.Ф.Александров, С.Ю.Галузо, В.И.Канаев // Тез. докл. IV Всесоюз. симпоз. по сильноточной электронике / ИЯФ СО АН СССР. Ч.2. Томск, 1982.

150. Особенности черенковского излучения релятивистского электронного потока в гофрированном волноводе / А.Ф.Александров, С.Ю.Галузо, В.И.Канаев и др. // ЖТФ. 1980. Т.50. № II.

151. Ковалев Н.Ф. Электродинамическая система ультрарелятивистской ЛОВ // Электрон.техника. Сер. I, Электроника СВЧ. 1978. № 3.

152. Канаев В.И. Тенденции развития релятивистской СВЧ электроники больших мощностей // Генераторы и усилители на релятивистских электронных потоках / МГУ. М., 1987.

153. Генератор мощных импульсов электромагнитного излучения релятивистскими сильноточными пучками электронов микросекундной длительности / С.П.Бугаев, В.И.Канавец, А.И.Климов и др. // Докл. АН СССР. 1984. Т.276. № 5.
154. Релятивистский многоволновый черенковский генератор / С.П.Бугаев, В.И.Канавец, А.И.Климов и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т.9. Вып.12.
155. Релятивистский многоволновый черенковский генератор с мощностью 10^{10} Вт / С.П.Бугаев, В.И.Канавец, А.И.Климов и др. // Препринт ТФ СО АН СССР. № 18. Томск, 1985.
156. Исследование релятивистского генератора дифракционного излучения миллиметрового диапазона / А.Ф.Александров, С.Ю.Галузо, В.И.Канавец и др. // Письма в ЖТФ. 1981. Т.7. Вып.10.
157. Экспериментальное исследование взаимодействия сильноточного РЭП с сверхразмерной замедляющей системой / А.П.Арзин, И.И.Винтизенко, В.И.Канавец и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т.12. Вып.16.
158. Arzin A.P., Kanavets V.I., Shtein Yu.G. Investigation of high power relativistic generation of diffraction 8 mm band radiation // Proc. 6th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Kobe, 1986. P.581.
159. Дифракционный генератор СВЧ-излучения миллиметрового диапазона / С.П.Бугаев, В.И.Коселев, В.А.Попов // Тез. УП Всесоюз. симпоз. по сильноточной электронике / ИСЭ СО АН СССР. Ч.1. Томск, 1988.
160. Саяпин А.Ф. Об использовании в сверхпроводящих ускорителях волноводной структуры постоянного сечения // ЖТФ. 1982. Т.52. № 7.
161. Investigation of interaction of high current relativistic electron beam with the uniformly curved waveguide / A.P.Arzin, A.N.Didenko, G.P.Fomenko et al. // Proc. 6th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Kobe, 1986. P.600.
162. Sessler A.M. The relativistic klystron two-beam accelerator // LBL Rept. Feb. 1987.
163. Sessler A.M., Yu S. Relativistic klystron two-beam accelerator // Phys. Rev. Lett. 1987. V.58. No 23. P.2439.
164. Allen M.A. Conventional power sources for colliders. SLAC-Pub-4375, July 1987.
165. Wilson P.B. RF pulse compression and alternative RF sources for linear colliders, SLAC-Pub-4803, December 1988.
166. Farkas Z.D. Radio frequency pulse compression, SLAC-Pub-4820. December 1988.
167. Yu S. Physics of relativistic klystron // Proc. of 1987 ECFA Workshop on New Developments in Part. Acc. Tech., Orsey, France. 29 June - 4 July 1987.
168. Сандалов А.Н. Численное моделирование физических процессов в мощных приборах сверхвысоких частот // Генераторы и усилители на релятивистских электронных потоках / Под ред. В.М.Лопухина. М., 1987.
169. Исследование физических процессов в релятивистском импульсном клистроне / А.М.Афонин, А.П.Руднев, А.Н.Сандалов, А.В.Теребилов // 36-я Всесоюз. науч. сессия, посвящ. Дню радио. М., 1981.

170. Энергообмен в выходном резонаторе релятивистского клистрона / Е.И.Васильев, В.И.Канавец, А.Н.Сандалов, А.В.Теребилов // Радиотехника и электроника. 1982. Т.27. № 7.

171. Экспериментальное исследование многопучкового релятивистского устройства / В.В.Михеев, А.Н.Сандалов, А.А.Стогов, А.В.Теребилов // Препринт физ. фак-та МГУ. № 10. М., 1982.

172. Прокопьев В.Е., Сандалов А.Н., Теребилов А.В. Исследование процессов группирования в релятивистском клистроне // 37-я Всесоюз. науч. сессия, посвящ. Дню радио. Ч.2. М., 1982.

173. Сандалов А.Н., Теребилов А.В. Особенности группирования и энергообмена в релятивистском многорезонаторном клистроне // Радиотехника и электроника. 1983. Т.28. № 9.

174. Теоретическое и экспериментальное исследование выходных систем приборов "0"-типа / А.М.Афонин, Е.И.Васильев, Я.Ш.Гранит и др. // Тез. X Всесоюз. конф. "Электроника СВЧ". Минск, 1983.

175. А.с. 1145833 СССР, МКИ Н03. Релятивистский клистрон / А.М.Афонин, Е.И.Васильев, А.Н.Сандалов, А.В.Теребилов (СССР). Приор. 28.10.83. Опубл. 14.11.84.

176. Сандалов А.Н. Численное моделирование нелинейного взаимодействия электронного потока и электромагнитного поля в приборах клистронного типа // Тез. X Всесоюз. конф. "Электроника СВЧ". Минск, 1983.

177. Исследование выходных систем приборов "0"-типа / А.М.Афонин, А.Ю.Пауткин, А.Н.Сандалов, А.А.Стогов // Тез. IV Всесоюз. семинара по релятивистской высокочастотной электронике / МГУ. М., 1984.

178. Энергообмен в многорезонаторной выходной системе релятивистского клистрона / А.М.Афонин, Е.И.Васильев, Я.Ш.Гранит и др. // Тез. IV Всесоюз. семинара по релятивистской высокочастотной электронике / МГУ. М., 1984.

179. Sandalov A.N., Terebilov A.V., Vasil'ev Ye.I. Relativistic effects in multicavity klystron // Proc. 6th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Kobe. 1986. P.566.

180. Электродинамическая система релятивистского клистрона / В.И.Бородин, А.П.Долганов, А.Н.Сандалов, А.А.Стогов // Тез. IV Всесоюз. семинара по релятивистской высокочастотной электронике / МГУ. М., 1984.

181. Бородин В.И., Сандалов А.Н. Многорезонаторный клистрон с релятивистским электронным потоком // Тез. IV Всесоюз. семинара по релятивистской высокочастотной электронике / МГУ. М., 1984.

182. Логутова Л.А., Сулакшин А.С., Цыганов В.В. Формирование магнитного поля и моделирование движения электронов в неоднородном магнитном поле релятивистского клистрона / Тез. IV Всесоюз. семинара по релятивистской высокочастотной электронике / МГУ. М., 1984.

183. Сандалов А.Н., Стогов А.А., Штейн Ю.Г. Теоретическое и экспериментальное исследование клистронного усилителя // Тез. XI Всесоюз. конф. по электронике СВЧ. Ч.I. Орджоникидзе, 1986.

184. Friedman M., Krall J., Lau Y.Y., Serlin V. Relativistic klystron amplifier // Proc. of SPIE 1988. V.873. P.92.

185. Балакин В.Е., Кузнецов Г.И., Хавин Н.Г. Исследование электронно-оптической системы мощной электронной пушки // Препринт ИЯФ 80-63. Новосибирск, 1980.

186. Генератор электронного пучка Элит-Л2 / В.Е.Балакин, Ю.Г.Бамбуров, В.М.Долгушин и др. // Тез. докл. IV Всесоюз. симпози. по сильноточной электронике. Т.2. Новосибирск, 1982; Томск, 1982.

187. Генератор электронного пучка для макета СВЧ генератора ВЛЭШ / В.Е.Балакин, Ю.Г.Бамбуров, С.Б.Вассерман и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техника физического эксперимента. Вып. I(10). Харьков, 1982.

188. Повышение параметров ускорителя Элит-Л, источника питания СВЧ генератора / В.Е.Балакин, Ю.Г.Бамбуров, В.М.Долгушин и др. // Тез. докл. IV Всесоюз. симпози. по сильноточной электронике. Т.2. Новосибирск, 1982; Томск, 1982.

189. Испытание ускоряющей секции линейного ускорителя ВЛЭШ / В.Е.Балакин, Ю.Г.Бамбуров, О.Н.Брежнев и др. // Тр. восьмого Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Т. II. Протвино, 1982; Дубна, 1983.

190. Балакин В.Е., Кузнецов Г.И., Хавин Н.Г. Формирование релятивистских электронных пучков для мощных СВЧ-приборов в системах с термокатодами // Релятивистская высокочастотная электроника / ИФ АН СССР. Вып. 3. Горький, 1983.

191. Элементы электронно-оптической системы ускорителя Элит-2 / В.Е.Балакин, В.М.Долгушин, И.В.Казарезов и др. // Препринт ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, 1984.

192. Схема мощного генератора РЭП с большой частотой повторения / В.Е.Балакин, Г.С.Крайнов, Г.И.Кузнецов, Н.Г.Хавин // IV Всесоюз. симпози. по сильноточной электронике / ИСЭ СО АН СССР. Ч. I. Томск, 1986.

193. Allen M.A. RF power sources. SLAC-Pub-4646, May 1988.

194. Relativistic klystron research for high gradient accelerators / M.A.Allen, R.S.Callin, H.Deruyter e.a. // SLAC-Pub-4650, June 1988.

195. Relativistic klystron research at SLAC and LLNL / M.A.Allen, R.S.Callin, H.Deruyter e.a. // SLAC-Pub-4662, June 1988.

196. Eppley K. Design of a 100 MW X-band klystron. SLAC-Pub-4900, February 1989.

197. Microwave and particle beam sources and propagation // Proc. SPIE, 1988. V.873.

198. Диденко А.Н., Юшков В.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. М., 1984.

ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Серия 1. Электроника СВЧ

Игорь Григорьевич Артюх
Александр Николаевич Сандалов
Александр Степанович Сулакшин
Геннадий Петрович Фоменко
Юрий Георгиевич Штейн

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ СВЧ-УСТРОЙСТВА СВЕРХБОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Редактор *Л. А. Варга*
Технический редактор *А. М. Гритчина*
Корректор *Т. И. Григорьева*

Т-17605	Подписано к печати 11.10 89	Формат 60×90/16
Печать офсетная	Усл. печ. л. 4,5	Уч.-изд. л. 5,6
Заказ № 2122	Цена 1 р. 12 к.	Тираж 1300 экз
		Индекс 4847

Издательство ЦНИИ «Электроника». Москва, 117415