



ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ
ТЕХНИКЕ

Серия I
ЭЛЕКТРОНИКА СВЧ
Выпуск 12 (1075)

А. П. Кейер, В. О. Ничипоренко

ГИРОПРИБОРЫ — СВЕРХМОЩНЫЕ
ГЕНЕРАТОРЫ И УСИЛИТЕЛИ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
ДЛИН ВОЛН ЗА РУБЕЖОМ

1984

УДК 621.385.68

В реферативном обзоре на основе данных зарубежных источников за 1977—1983 гг. рассмотрены состояние разработок, исследований и перспективы развития сверхмощных генераторов и усилителей миллиметрового диапазона длин волн — гиротронов. Даны сведения об истории возникновения и принципе действия этих приборов. Приведены характеристики гиротронов, разработанных и разрабатываемых крупнейшими зарубежными фирмами и лабораториями для применения в исследованиях по осуществлению управляемой термоядерной реакции, в радиолокации и системах связи миллиметрового диапазона.

Обзор предназначен для разработчиков и научных работников, занимающихся вакуумными СВЧ-приборами миллиметрового диапазона и их использованием.

Ключевые слова: мазер на циклотронном резонансе (МЦР), гиротрон, синхронизм, азимутальная группировка, винтовой электронный пучок, циклотронная частота, сверхразмерные электродинамические системы, селекция мод, выходная мощность, устойчивость режима работы, сверхпроводящий соленоид, неоднородное магнитное поле, коэффициент усиления, полоса усиления, распределенное взаимодействие, разброс скоростей электронов, окно вывода энергии, входной узел связи.

Научный редактор

канд. техн. наук В. Е. МЯСНИКОВ

МИНИСТЕРСТВО ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Серия I. Электроника СВЧ

Выпуск I2(I075)

А.П.Кейер, В.О.Ничипоренко

ГИРОПРИБОРЫ – СВЕРХМОДНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И УСИЛИТЕЛИ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН ЗА РУБЕЖОМ

(по данным зарубежной печати за 1977–1983 гг.)

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	2
1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ГИРОПРИБОРОВ.....	3
2. РАЗВИТИЕ ГИРОТРОНОВ–ГЕНЕРАТОРОВ ЗА РУБЕЖОМ.....	13
3. РАЗВИТИЕ ГИРОТРОНОВ–УСИЛИТЕЛЕЙ ЗА РУБЕЖОМ.....	24
3.1. Развитие гироклистронов.....	25
3.2. Развитие гиро-ЛДВ.....	29
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	45
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	48

ВВЕДЕНИЕ

Освоение миллиметрового диапазона электроникой СВЧ сулит расширение возможностей в областях традиционного применения и открывает новые области использования СВЧ-энергии. Многие усовершенствования в традиционных областях применения, например в радиолокации, определяются уменьшением длины волны, что позволяет увеличить разрешающую способность РЛС, уменьшить габариты антенн, увеличить абсолютное значение полосы рабочих частот. Иные усовершенствования обязаны особенностям поглощения миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере и ионосфере [1,2].

В области науки миллиметровые волны применяются в молекулярной спектроскопии в физических и химических исследованиях, терапии и диагностике рака в медицине, при нагреве и диагностике плазмы посредством использования электронного циклотронного резонанса в исследованиях по осуществлению управляемой термоядерной реакции. По-видимому, возможны разнообразные применения и в промышленности, но эта область в силу ряда причин исследована значительно меньше, чем области военного и научного применения [3-5].

Реализация указанных возможностей тесно связана с усовершенствованием и созданием генераторов и усилителей, измерительной техники, детекторов, измерителей мощности, волноводных трактов различного назначения и их элементов. Несомненно, однако, что наличие сверхмощных источников СВЧ-энергии в этом диапазоне во многом определяет темпы прогресса в освоении областей применения и в создании элементной базы. Такие источники - гиротроны - были предложены в СССР [6] и в настоящее время переживают период бурного промышленного развития. Среди них уже имеются конструктивно сложившиеся схемы, к которым можно отнести генераторы-гиромонотроны, осваиваемые промышленностью [7]. Однако многие разработки, особенно усилителей, находятся на стадии экспериментальных исследований в соответствии с программами, объявленными исследовательскими центрами и фирмами [7,8]. Опубликованные данные по уже полученным результатам исследований позволяют оценить уровень выходных параметров приборов, которые будут созданы в ближайшие годы.

Настоящий обзор посвящен состоянию разработок gyroприборов — сверхмощных генераторов и усилителей миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов за рубежом. В нем даны сведения о принципе действия, характеристиках и особенностях разработанных и разрабатываемых приборов, областях их применения и направлениях дальнейших исследований на основании информации, представленной в зарубежных публикациях к концу 1983 — началу 1984 г.

I. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ГИРОПРИБОРОВ

На протяжении последних тридцати лет электроника добилась больших успехов в создании мощных источников когерентного ВЧ-излучения, перекрывающих широкую часть спектра электромагнитных волн от оптического до метрового диапазона. Для освоения различных частей спектра были разработаны источники, использующие различные механизмы излучения. В видимой и инфракрасной частях оптического диапазона такими источниками являются оптические генераторы или лазеры, основанные на усилении электромагнитных волн посредством индуцированного излучения возбужденных атомов и молекул. Характерная отличительная черта этих источников — использование сверхразмерных электродинамических систем, представляющих собой открытые резонаторы и волноводы, характерные размеры которых существенно превышают длину волны излучения. Большая энергия фотона в оптическом диапазоне и большой объем, заполненный рабочим веществом, определяют их высокую мощность. Частота излучения достаточно жестко фиксирована частотой квантового перехода.

В сантиметровом и дециметровом диапазонах для усиления и генерирования мощного когерентного излучения с успехом применяются различные электровакуумные приборы, среди которых наибольшее распространение получили ЛВВ О- и М-типа, магнетроны и клистроны. В этих приборах энергия, запасенная в форме кинетической или потенциальной (в магнетронах) энергии электронов, передается с помощью черенковского или переходного излучения ВЧ-колебаниям, возбужденным в электродинамических системах с замедленными волнами или в резонаторах. Действие этих приборов характеризуется определенными механизмами фазировки электронов, необходимой для конструктивной интерференции возбуждаемых ими электромагнитных колебаний [9, 10].

В этих источниках большая плотность энергии обеспечивается большой энергией каждого электрона и достаточно высокой их концентрацией. Мощность излучения имеет порядок мощности пучка, т.е. $I_0 U_0$, где I_0 — ток, U_0 — потенциал, и может достигать мегаваттного уровня. Для этих СВЧ-приборов, вообще говоря, характерна работа на низких видах колебаний и типах волн, так как здесь ... частоты, спо-

собной жестко фиксировать рабочий диапазон, наподобие квантового перехода в оптических генераторах, и поэтому требования к разреженности спектра электродинамических систем являются весьма серьезными. Это затрудняет их использование в области коротких, в частности, миллиметровых волн. Однако еще большее препятствие — необходимость применения мелкоструктурных элементов для замедления волн или для обеспечения малого по сравнению с периодом ВЧ-колебаний времени пролета электронов в ВЧ-поле. Наличие в электродинамической системе элементов, имеющих размеры, принципиально меньшие длины волны излучения, в миллиметровом диапазоне быстро приводит к потере эффективности прибора из-за ограничений, связанных с пробоем, тепловыделением и трудностями изготовления [II].

Оптические генераторы также оказываются неэффективными в диапазоне миллиметровых волн и в более длинноволновых диапазонах в основном из-за уменьшения запасенной энергии на атом или молекулу вещества. В результате в конце пятидесятых-начале шестидесятых годов сложилась несколько необычная ситуация, когда в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн отсутствовали сверхмощные источники излучения, в то время как в соседних диапазонах достигнутая мощность превышала мегаваттный уровень. Выход был найден в конце 50-х годов, когда практически одновременно и независимо друг от друга Твиссом в Австралии [I2], Гапоновым в СССР, Шнайдером в ФРГ [I3] и Пантеллом в США [I4] было установлено существование эффекта стимулированного усиления излучения в ансамбле электронов, вращающихся с циклотронной частотой в магнитном поле. Усиление происходит при многократных последовательных переходах электронов на низшие энергетические уровни [I5]. Каждый переход индуцирован ВЧ-полем и сопровождается когерентным излучением. Для преобладания излучения над поглощением существенно неэквидистантность энергетических уровней, обусловленная зависимостью циклотронной частоты от энергии движения электронов, имеющей релятивистский характер. Ввиду больших квантовых чисел, характеризующих начальное состояние и подавляющую часть переходов, такой эффект допускает простую трактовку в рамках классической физики. В приборах, основанных на этом принципе и названных позднее мазерами на циклотронном резонансе (МЦР) [I6, I7], удается сочетать достоинства приборов оптического и сантиметрового диапазонов длин волн и в то же время освободиться от ограничений и присущих им недостатков, ведущих к уменьшению выходной мощности в миллиметровом диапазоне [6]. От оптических генераторов МЦР выгодно отличается большой энергией, запасенной в рабочем веществе, представляющем собой поток электронов, движущихся по спиральным траекториям в магнитном поле. Мощность излучения приближается к мощности пучка, которая может быть сохранена такой же, как

и в длинноволновом диапазоне, благодаря возможности использования сверхразмерных электродинамических систем. Из-за наличия частоты перехода - циклотронной частоты - спектр излучения оказывается достаточно жестко фиксированным. Последнее выгодно отличает МПР от традиционных приборов СВЧ-электроники и устраняет главное препятствие на пути использования в миллиметровом диапазоне длин волн энергии, запасенной в кинетическом движении электронных пучков.

С точки зрения физики традиционных СВЧ-приборов в МПР условие синхронизма электронов с ВЧ-полем выполнено вследствие равенства циклотронной частоты (или ее гармоник) и доплеровской частоты используемой рабочей моды и не нуждается в каких-либо мелкоаппаратных элементах электродинамической системы для своего поддержания. Поэтому устройства такого типа иногда называют приборами с быстрой волной [18], имея в виду возможность применения электромагнитных волн в гладких однородных волноводах в качестве рабочих на частотах, близких к частоте отсечки, где фазовая скорость волны заметно больше скорости света. При этом существенной является азимутальная группировка, обусловленная зависимостью циклотронной частоты от кинетической энергии, в то время как пространственная группировка играет вспомогательную роль. Основные закономерности такой группировки близки соответствующим закономерностям хорошо изученной группировки, характерной для приборов О-типа, так что многие привычные схемы приборов О-типа имеют свои МПР-аналоги, приведенные в табл. I. I, взятой из работы [6].

Таблица I. I

МПР-аналоги

Приборы О-типа					
Типы гиротронов					
Распределение ВЧ-поля					
Осцилляторный КПД	0,42	0,34	0,7	0,2	0,6

Наличие аналогов позволяет предугадать большие потенциальные возможности, которыми обладают приборы типа МПР. Однако для их реализации необходима схема, которая учитывает специфику работы многомодовых электродинамических систем и систем формирования винтовых электронных пучков. Создание такой конструкции потребовало больших усилий в исследовании указанных вопросов. На начальной стадии экспериментов, проводившихся в 60-х годах, уровень достигнутой мощности, несмотря на наличие развитой теории нелинейного взаимодействия винтовых пучков с ВЧ-полем, долгое время не превышал 1 кВт вследствие несовершенства применявшихся схем. Такое положение сохранялось вплоть до 1966 г., когда наконец удалось найти конструкцию МПР-генератора (рис. I.1), названного впоследствии гиротроном [6], в которой достаточно простым и эффективным способом реализуются возможности получения сверхвысокого уровня ВЧ-мощности. Главные элементы этой схемы и по сей день служат основой разработок, имеющих практическое значение.

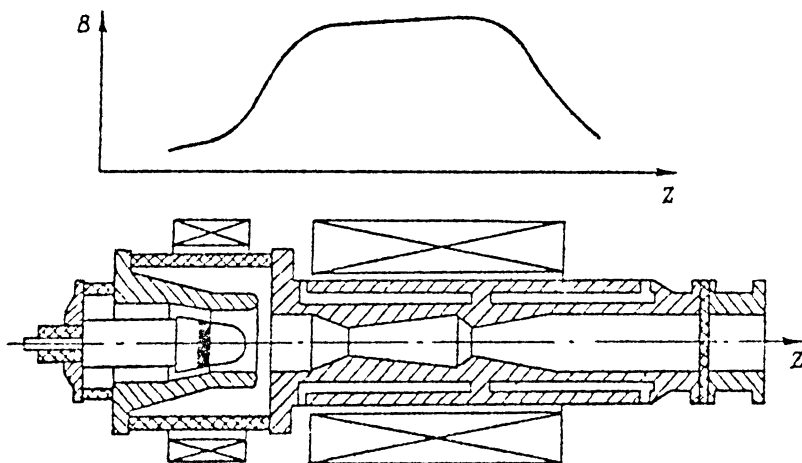


Рис. I.1. Схема гиротрона

Важным конструктивным элементом гиротрона является адиабатическая магнетронно-инжекторная электронная пушка (рис. I.2), позволяющая эффективно формировать мощные винтовые пучки с большой долей энергии вращения электронов и достаточно малой величиной разброса скоростей поступательного движения [6]. Она используется в совокупности с электродинамической системой, представляющей собой цилиндрический резонатор, который с помощью плавного сужения

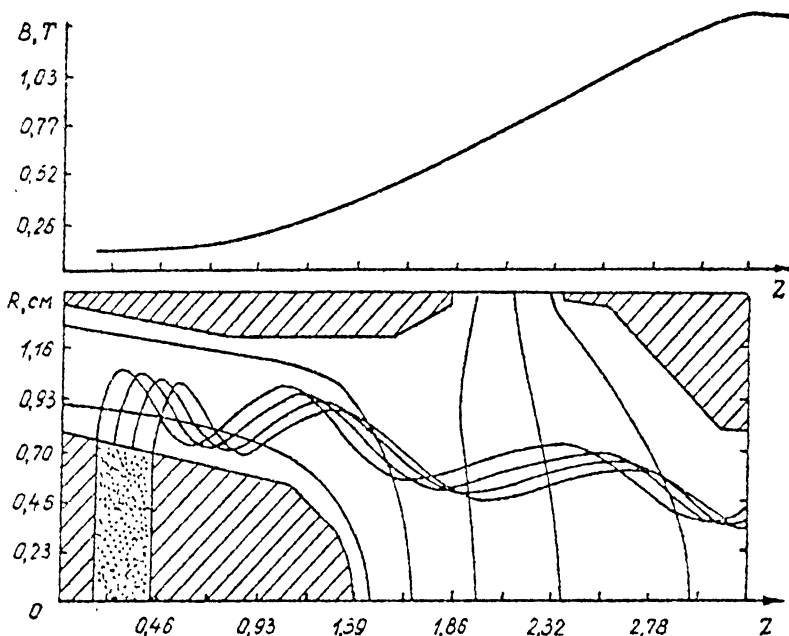


Рис. 1.2. Электронно-оптическая система гиروتрона

в направлении пучка сопрягается с волноводом, запредельным для рабочего вида колебаний на рабочей частоте. Плавность сужения позволяет устранить трансформацию рабочей моды в моды с меньшими радиальными индексами и обеспечивает как экранировку пространства формирования пучка от попадания ВЧ-энергии, так и полное отражение рабочей моды. Со стороны коллектора резонатор либо имеет плавное сужение, переходящее затем в плавно расширяющийся конус и цилиндрический волновод, служащий одновременно выводом энергии и коллектором электронов, либо с помощью плавно расширяющегося конуса сопрягается непосредственно с цилиндрическим волноводом. В любом случае на коллекторном конце резонатора осуществляется частичное отражение рабочей моды, обеспечивающее резонансные свойства и одновременно вывод энергии. В выходном волноводе после охлаждаемой поверхности коллектора располагается окно вывода энергии. Вся конструкция размещается в магнитном поле, создаваемом обычно сверхпроводящим соленоидом, так как напряженность магнитного поля, используемого в гиروتронах, велика и составляет примерно 100 кГс для рабочей длины волны 1 мм. Резонатор расположен в однородной части поля. По обе стороны от резонатора напряженность магнитного поля достаточно быстро убывает, обеспечивая формирование пучка в катодной области и оседание электронов, движущихся вдоль силовых линий магнитного поля, на стенке коллектора.

В адиабатической магнетронно-инжекторной электронной пушке, работающей в режиме ограничения тока эмиссии катода температурой, на поверхности эмиттера имеется достаточно сильное электрическое поле и магнитное поле рассеяния соленоида, силовые линии которого выходят из поверхности эмиттера в направлении резонатора, составляя с ней небольшой угол. В скрещенных полях электроны движутся по циклоидальным траекториям и одновременно дрейфуют в направлении резонатора вдоль магнитных силовых линий. Циклоидальное движение создает первоначальное вращение электронов.

Для управления формированием пучка в прикатодной области обычно используется конструкция пушек, содержащие два анода. Расположенный над катодом промежуточный анод имеет регулируемый потенциал и служит для создания указанного начального вращения электронов. Второй анод находится под потенциалом земли и служит для ускорения электронов в направлении резонатора. Покидая прикатодную область, электроны попадают в область компрессии, где существует нарастающее по ходу движения электронов магнитное поле, а электрическое поле близко к нулю. При движении в области компрессии ведущий центр электронной орбиты скользит вдоль магнитной силовой линии, являющейся с точностью до азимутального поворота, одинаковой для всех электронов, силовой линией, проходящей через точку старта электрона. В процессе движения к резонатору радиус пучка уменьшается из-за сходимости силовых линий в нарастающем магнитном поле, а энергия вращения электронов увеличивается за счет уменьшения энергии поступательного движения. Увеличение происходит в соответствии с сохранением величины адиабатического инварианта, равного отношению энергии вращения к напряженности магнитного поля. Энергию вращения электронов принято характеризовать параметром, равным отношению скорости вращения к скорости поступательного движения. Основные значения этого параметра изменяются примерно от 1 до 2. Для регулировки величины энергии вращения электронов в резонаторе обычно используется вспомогательный соленоид, размещаемый над катодом, снаружи пушки. Такой способ регулировки сопровождается одновременно изменением радиуса пучка в резонаторе. Другая возможность изменения энергии вращения электронов связана с изменением распределения потенциала на первом и втором анодах пушки. Радиус пучка при этом остается постоянным. Гибкая система формирования пучка позволяет осуществлять настройку на оптимальный режим работы с большой выходной мощностью и высоким КПД, который в современных гиротронах близок к 60 % [19, 20]. Типичные параметры пучка, реализуемые в гиротронах миллиметрового диапазона на уровне мощности от сотен киловатт до мегаватта, составляют примерно от 50 до 80 кВ напряжения и от 10 до 40 А тока [21].

В резонаторе электроны попадают в ВЧ-поле рабочей моды, самовозбуждающейся в режиме автоколебаний, если ток пучка превышает стартовый ток, а напряженность магнитного поля обеспечивает выполнение условий циклотронного резонанса. После относительно короткого — несколько сотен циклотронных периодов — переходного процесса амплитуда ВЧ-колебаний стабилизируется и электроны, попадая в резонатор, движутся в ВЧ-поле рабочей моды, совершая практически монохроматические колебания. В процессе движения последовательно происходят модуляция энергии электронов, их группировка и отбор энергии от сформировавшихся сгустков. Большая часть этой энергии попадает через дифракционный вывод энергии в выходной волновод и далее через окно вывода энергии в нагрузку, а относительно небольшая часть теряется на нагрев стенок резонатора, окна вывода энергии, стенок выходного тракта и за счет переизлучения в другие моды.

Полезная энергия электронов заключена во вращательном движении, и для ее отбора существенно ВЧ-поле с электрическими компонентами, перпендикулярными оси волновода. Подходящие свойства имеет TE_{nr} (H_{nr})-моды волноводов и резонаторов. Эффективная длина резонатора составляет приблизительно от 4 до 7 длин волн излучения в свободном пространстве. В области рабочих частот спектр эквивалентного закрытого цилиндрического резонатора оказывается очень густым. В гиротронах спектр фактически определяется только видами колебаний, у которых осевые индексы не превышают единицы, т.е. на длине резонатора укладывается половина волноводной длины волны рабочей моды [6]. Прореживание спектра достигается использованием открытых резонаторов с дифракционным выводом энергии. Виды колебаний с осевыми индексами, превышающими единицу, формируются при отражении волноводных волн с постоянными распространения, большими чем у волн рабочего вида колебаний. Такие волны имеют большую групповую скорость и существенно хуже отражаются от дифракционного вывода энергии. Поэтому с увеличением осевого индекса добротность колебаний заметно уменьшается и они оказываются неконкурентоспособными по отношению к рабочему виду [22,23]. Густота спектра резонатора близка к густоте спектра мембраны. Этого обычно достаточно для обеспечения устойчивого режима самовозбуждения рабочей моды в относительно широком диапазоне рабочих параметров. Однако в коротковолновой части миллиметрового диапазона, где для достижения высокого уровня мощности приходится использовать высшие виды колебаний, спектр мембраны оказывается также слишком густым и конкуренция мод проявляется весьма остро, что в первую очередь сказывается на существенном сужении области рабочих параметров, в которой возможно самовозбуждение ВЧ-колебаний на рабочей моде. Конкуренция мод приводит к уменьшению КПД гиротрона к нарушению стабиль-

ности его работы. Решение проблемы конкуренции мод в гиротронах непрерывного действия наряду с проблемами теплоотвода и вывода ВЧ-мощности мегаваттного уровня в диапазоне 100 ГГц и более — одна из важнейших задач [21].

Электронный пучок, покидая резонатор, попадает в область убывающего магнитного поля. Электроны выходят из синхронизма с ВЧ-полем и движутся вдоль расходящихся силовых линий магнитного поля к стенкам коллектора, который, как уже говорилось, в простейшем случае представляет собой охлаждаемую часть боковой поверхности выходного волновода. Такое совмещение функций весьма удачно и просто решает проблему вывода энергии и проблему коллектора для достаточно высокого уровня средней мощности. Однако при сверхвысоких уровнях мощности совмещение функций может оказаться препятствием для достижения цели из-за ограничения возможности увеличения поверхности коллектора, связанного с переизлучением рабочей моды в моды с меньшими радиальными индексами [7, 24]. Проблема охлаждения коллектора и разработки окна вывода энергии является весьма острой для гиротронов, предназначенных для нагрева плазмы в исследованиях по осуществлению управляемой термоядерной реакции [II, 25].

Рассмотренная схема гиротрона содержит многие элементы, которые могут применяться и в других разновидностях этих приборов — гиро-ЛБВ, гироклистронах и гиро-ЛОВ. Ни усилители — гиро-ЛБВ и гироклистрон, ни генератор — гиро-ЛОВ — к настоящему времени не прогрессировали настолько, чтобы найти практическое применение. В экспериментах часто используются различные конструктивные решения таких узлов, как ввод энергии, система формирования пучка и т.п. Поэтому здесь целесообразно рассмотреть только принципиальные особенности этих приборов (см. табл. I. I).

Схема гироклистрона может быть получена с помощью добавления одного или нескольких резонаторов к рассмотренной выше схеме гиротрона-генератора. Резонаторы разделяются трубами дрейфа, представляющими собой заперделльные волноводы для рабочей моды на рабочей частоте. В первом резонаторе тем или иным способом осуществляется связь с входным трактом, по которому ВЧ-мощность усиливаемого сигнала подводится к прибору [7, 26, 27]. Выходной резонатор аналогичен резонатору гиromонотрона, а промежуточные резонаторы могут содержать элементы настройки собственной частоты и поглощающие материалы.

Процесс усиления в гироклистроне повторяет в существенных чертах процесс усиления в клистронах O-типа. Во входном резонаторе энергия вращения электронов модулируется ВЧ-полем входного сигнала. Следствием этой модуляции является модуляция циклотронной частоты, приводящая к азимутальной группировке электронов. Последняя проте-

кает во время их движения в трубке дрейфа и заканчивается образованием ступок, поступающих в простейшем случае двухрезонаторного гироспиратора в выходной резонатор. Сгруппированный пучок представляет собой источник ВЧ конвекционного тока, который, в отличие от клистронов типа "О", является поперечным и возникает из-за вращения электронов. ВЧ конвекционный ток возбуждает в выходном резонаторе ВЧ-поле с частотой усиливаемого сигнала. Источником энергии, питающим ВЧ-колебания, служит кинетическая энергия вращающихся электронных ступок, преобразуемая в энергию ВЧ-поля в процессе их торможения в выходном резонаторе. В режиме установившихся ВЧ-колебаний энергия, передаваемая от электронов ВЧ-полю, в точности восполняет потери, связанные с поступлением ВЧ-энергии в нагрузку и с потерями ее в стенках резонатора.

Для увеличения коэффициента усиления и КПД в гироспираторе могут быть использованы промежуточные резонаторы. ВЧ-поле, возбуждаемое в них электронами, приводит к дополнительной модуляции энергии вращения, что позволяет ускорить процесс группирования и улучшить качество ступок. Энергия, теряемая электронами в промежуточных резонаторах, как правило, мала и в установившемся режиме расходуется на нагрев стенок резонаторов.

Усиление ВЧ-сигнала в гироспираторе в принципиальном отношении аналогично усилению в ЛБВ О-типа. Здесь также происходит взаимодействие электронов с ВЧ-полем волны, распространяющейся в направлении их поступательного движения. Электродинамическая система гироспиратора представляет собой гладкий волновод, содержащий устройство ввода ВЧ-сигнала, расположенное в месте влета электронов. На коллекторном конце волновода обеспечивается хорошее согласование с выходным трактом. Выход электронов из синхронизма может быть осуществлен с помощью достаточно быстрого уменьшения напряженности магнитного поля.

Теоретически усиление в гироспираторе можно получить на любой частоте, превышающей частоту отсечки рабочего типа волны, с помощью соответствующей настройки напряженности магнитного поля. Однако практически реализуемыми оказываются режимы работы вблизи отсечки, в которых азимутальная группировка электронов играет определяющую роль. Такая ситуация возникает, во-первых, из-за ограничений, связанных с самовозбуждением ВЧ-колебаний на встречной волне, если циклотронная частота превышает или даже просто близка к частоте отсечки — спектр доплеровских частот встречных волн начинается с частоты отсечки — и, во-вторых, из-за ограничений, связанных с разбросом скоростей электронов. На частоте, значительно превышающей частоту отсечки, доплеровский сдвиг частоты оказывается большим и разным для электронов, имеющих различные скорости поступатель-

ного движения. В этих условиях невозможно поддерживать синхронизм волны с большей частью электронов. Это приводит к срыву усиления.

Другим основанием для использования частот вблизи отсечки в качестве рабочего диапазона гиро-ЛВВ является требование реализации относительно широкополосного усиления. Так как в гиро-ЛВВ условие синхронизма заключается в равенстве циклотронной и доплеровской частот, то ширина полосы усиления будет наибольшей в том случае, когда доплеровская частота слабо зависит от частоты сигнала. Эти условия осуществляются, если групповая скорость волны равна скорости поступательного движения электронов. При этом доплеровская частота имеет минимум, расположенный ниже частоты отсечки волновода. Величина его определяет выбор напряженности магнитного поля. Соответствующие условия получили в зарубежной литературе название синхронизма касания, так как при их выполнении дисперсионные кривые быстрых циклотронных волн и волноводных волн на плоскости $K_z - \omega$, где K_z — постоянная распространения, касаются друг друга [28-34]. Близость рабочего диапазона к частоте отсечки и выполнение условий синхронизма при величине циклотронной частоты, меньшей, чем частота отсечки, обеспечивают достаточно слабое влияние разброса скоростей электронов на коэффициент усиления и хорошую устойчивость режима работы.

Процесс усиления в гиро-ЛВВ, работающей, например, в условиях точного синхронизма, качественно протекает следующим образом. Двигаясь в волне усиливаемого сигнала, электроны получают модуляцию энергии вращения и циклотронной частоты, в результате которой происходит их вихвильная группировка. Стусетки образуются в окрестности фаз разделяющей области, где происходит ускорение и торможение электронов. По мере образования стусетков в пучке возникает гармоника конвекционного ВЧ-тока, возбуждающая волну ВЧ-поля, интерферирующую с волной усиливаемого сигнала. Фаза возбуждаемой волны соответствует условиям максимального торможения электронных стусетков. Поэтому по мере ее возникновения стусетки постепенно перемещаются в область торможения, что приводит к передаче энергии вращения электронов волне ВЧ-поля и усилению последней.

Возможной и перспективной схемой генератора с перестраиваемой частотой является схема гиро-ЛОВ [6,35]. В этой схеме осуществляется взаимодействие электронов с ВЧ-полем бегущей волны, встречной по отношению к направлению движения электронов, что позволяет обеспечить обратную связь в лампе за счет различного направления скорости перемещения электронов и групповой скорости волны таким же способом, как и в ЛОВ 0-типа. Условия синхронизма электронов с встречной волной снова состоят в примерном равенстве циклотронной и доплеровской частот, что позволяет, изменяя напряженность

магнитного поля в пространстве взаимодействия, изменять частоту генерирования. Схема пространства взаимодействия gyro-ЛОВ подобна схеме пространства взаимодействия gyro-ЛБВ, однако здесь вывод энергии должен осуществляться с катодного конца волновода. На коллекторном конце волновода необходимо обеспечить отсутствие отражений, которые могли бы внести резонансные свойства в электродинамическую систему и препятствовать желаемой перестройке частоты генерирования. Эти устройства, по-видимому, наиболее чувствительны к влиянию разброса скоростей электронов и к конкуренции мод, возникающей при перестройке напряженности магнитного поля. Конкуренция мод может существенно ограничивать диапазон перестройки частоты генерирования на заданной рабочей моде при использовании сверхразмерных электродинамических систем. Поэтому можно ожидать, что в gyro-ЛОВ в простейшем варианте могут быть использованы относительно низкие рабочие типы волн и ее мощность будет ограничена.

2. РАЗВИТИЕ ГИРОТРОНОВ-ГЕНЕРАТОРОВ ЗА РУБЕЖОМ

В силу ряда причин теоретические и экспериментальные исследования гиروتронов за рубежом, в частности в США, начались с некоторым опозданием — в середине 70-х годов, — когда в этих приборах уже был достигнут уровень импульсной мощности около 100 кВт и они успешно использовались для экспериментов по электронному циклотронному нагреву плазмы в токамаках ТМ-3 и ФТ-1. Появление мощных СВЧ-источников миллиметрового диапазона, в свою очередь, стимулировало разработку систем, в которых их применение могло дать значительные преимущества.

В зарубежных обзорах в числе перспективных областей применения гиروتронов, как генераторов, так и усилителей, называются радиолокация миллиметрового диапазона, системы связи, СВЧ-энергетика, исследование спектров молекул в физических экспериментах [1-4, 36]. Однако наиболее перспективной областью применения сверхмощных гиروتронов-генераторов по-прежнему остается область исследований по осуществлению управляемой термоядерной реакции, где с их помощью стала возможной постановка уникальных плазменных экспериментов [37-40]. В результате расширения сферы практического использования требования, предъявляемые как к параметрам гиروتронов, так и к характеристикам систем транспортировки ВЧ-мощности, постоянно возрастают, что, в свою очередь, стимулирует теоретические и экспериментальные исследования этих СВЧ-приборов.

Для обеспечения экспериментальных исследований по объемному нагреву плазмы с использованием электронного циклотронного резонанса, согласно оценкам [41, 42], может потребоваться мощность от

держалось в модах TE_{01} и TM_{03} [43]. Позднее выходная мощность этого гиротрона была доведена до 342 кВт [44].

Следующий этап в выполнении объявленной программы состоял в разработке гиротрона в диапазоне 60 ГГц, непрерывная выходная мощность которого составила 214 кВт при КПД 34 % на рабочей моде H_{021} . Этот результат был получен в 1983 г. [45]. В качестве промежуточного результата можно отметить 70 кВт в режиме непрерывного генерирования и 200 кВт в режиме с длительностью импульсов 100 мс, достигнутые в 1982 г. Существенное продвижение вперед стало возможным после использования резонаторов, имеющих ступенчатый профиль. Не менее важно также применение нарастающего к концу резонатора магнитного поля. Оба способа получения устойчивого возбуждения рабочей моды с высоким КПД были предложены сотрудниками NRL. Кроме указанных новшеств, в разработке использовалась конструкция окна вывода энергии, позволяющая пропускать высокий уровень непрерывной мощности. Окно вывода энергии состояло из двух близко расположенных дисков из окиси алюминия, между которыми циркулировал хладагент FC-75, — инертная жидкость на основе фтористого углерода. Схлаждение большой поверхности окна наряду с низкой температурой FC-75, поддерживаемой на уровне 15°C, позволило обеспечить отвод тепла при температуре керамики, не превышавшей 100°C. Во время испытаний в непрерывном режиме температура окна контролировалась с помощью специальной установки, работавшей в инфракрасном диапазоне. Отмечается, что температура заметно изменялась во времени, хотя мощность гиротрона оставалась практически постоянной. Этот эффект объясняется малыми уходами частоты генерирования, приводящими к перераспределению фаз смеси мод на поверхности окна [45].

При испытаниях гиротрона в импульсном режиме при длительности импульса 0,5 мс и скважности 50 была получена мощность 250 кВт при КПД 39 %. Перепад магнитного поля на длине резонатора составлял 6 % — напряженность поля на коллекторном конце была выше, чем на катодном. При 3%-ном перепаде магнитного поля КПД достигал 35 %, а выходная мощность 230 кВт. Отмечается сужение динамического диапазона при большой величине (6–9 %) перепада магнитного поля и изменение условий формирования пучка в области нарастающего магнитного поля, выражающееся в появлении оседания электронов на анод пучки и корпус прибора. При полном отсутствии перепада магнитного поля КПД существенно уменьшался, поэтому выходная мощность 200 кВт не могла быть получена, несмотря на то, что конкуренция мод при этом еще не проявлялась [45].

В результате испытаний в импульсном режиме был сделан вывод: применение ступенчатого резонатора при перепаде магнитного поля от 2 до 6 % успешно устраняет конкуренцию мод в широком диапазоне ра-

бсчх параметров на уровнях мощности около 200 кВт и приводит к существенному расширению динамического диапазона по сравнению с предыдущими испытаниями, в которых использовалась традиционная конструкция резонатора с модой TE_{021} [45]. Работа фирмы, направленная на создание гиротрона в диапазоне 120 ГГц, продолжается.

В NRL интенсивно исследовались возможности увеличения КПД и улучшения стабильности работы гиротронов в диапазоне 35 ГГц. В 1979 г. сотрудниками NRL проводились испытания гиротрона с рабочей модой H_{011} [46], в которых получена выходная мощность 150 кВт с КПД 30 % в импульсном режиме с длительностью импульсов около 10 нс. С целью увеличения КПД применялись резонаторы, имеющие расширяющийся профиль и распределение магнитного поля, напряженность которого увеличивалась к коллекторному концу резонатора по закону, близкому к линейному. Предварительные результаты испытаний указывали на возможность увеличения КПД примерно в 1,3 раза, т.е. до 40 % при оптимальном выборе распределения магнитного поля. Гиротрон использовался в экспериментах по нагреву плазмы в Ок-Ридже.

Позднее NRL начала исследования гиротрона с рабочей модой TE_{041} [19,47]. В экспериментах, проведенных в режиме с длительностью импульсов 1,4 нс в однородном магнитном поле [47] и в поле, линейно нарастающем в сторону коллекторного конца резонатора [19], был получен максимум КПД 40 и 60 % соответственно. Во втором случае увеличение КПД наблюдалось при оптимальной настройке распределения магнитного поля.

В этом гиротроне [47] проведено теоретическое и экспериментальное исследование конкуренции мод TE_{041} и паразитной моды TE_{241} , области самовозбуждения которых перекрывались, а стартовые токи имели близкие значения. В результате авторы пришли к выводу, что, во-первых, самовозбуждается только одна из мод — в зависимости от настройки магнитного поля; во-вторых, обычно самовозбуждается та мода, которая стартует первой по мере нарастания напряжения на переднем фронте импульса, хотя при работе с длинными импульсами возможен перескок режима генерирования с одной моды на другую, вызванный небольшими изменениями рабочих параметров, а время нарастания переднего фронта импульса играет существенную роль. В связи с этим указана возможность обеспечения устойчивого режима работы гиротронов с высшими TE_{0lm} -модами с помощью оптимального выбора формы импульса. Однако дальнейшие исследования конкуренции мод в этом гиротроне позволили найти более надежный способ обеспечения самовозбуждения рабочей моды, состоящий в использовании ступенчатого резонатора (рис.2.1), параметры которого подобраны таким образом, что собственная частота моды TE_{011} в узком резонаторе совпадает с собст-

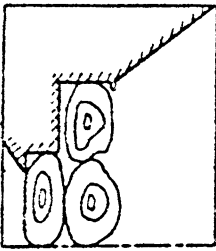


Рис.2.1. Ступенчатый резонатор гиروتрона в модах TE_{011} и TE_{021}

Гиروتрон со ступенчатым резонатором продемонстрировал устойчивую работу на симметричной моде, так что конкурирующая мода TE_{241} не самовозбуждалась (аналогичным образом не самовозбуждалась конкурирующая мода TE_{221} в гиروتроне фирмы "Varian"). Максимум мощности, полученной в этом гиротроне, составлял 340 кВт при КПД 54 % и длительности импульса 1 мкс. Максимальный КПД достигал 63 % при выходной мощности около 150 кВт. Эти результаты были получены для оптимального распределения магнитного поля вдоль пространства взаимодействия. Предполагается, что схемы такого рода могут быть использованы для достижения мощности 1 МВт в непрерывном режиме в диапазоне 100 ГГц, например, для комбинации мод TE_{021}/TE_{061} [20].

Кроме практических разработок гиروتронов сотрудниками NRL рассмотрены проекты гиروتронов, предназначенных для реализации непрерывного режима генерирования мощности на уровне 1 МВт в диапазоне 100 ГГц. В проекте, описанном в работах [11,25] (рис.2.2),

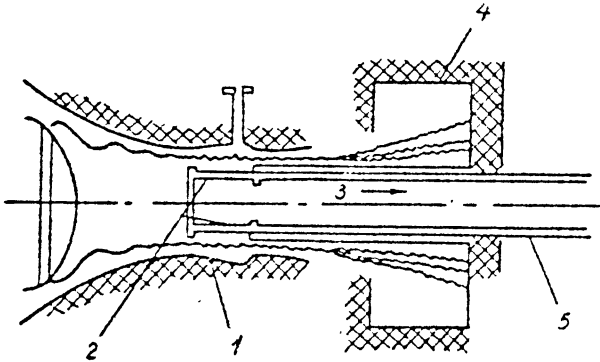


Рис.2.2. Принципиальная схема многомегаваттного гиروتрона для нагрева плазмы:

1 - коаксиальный резонатор TE_{m11} ; 2 - вывод энергии из резонатора в выходной волновод; 3 - TE_{021} -мода; 4 - коллектор под пониженным потенциалом; 5 - выходной волновод, соединяющий непосредственно с плазменной камерой (через систему вакуумных насосов и геттеров)

рассматривается возможность решения проблемы конкуренции мод, проблемы коллектора и окна вывода энергии. Для решения проблемы конкуренции мод предлагается применять коаксиальный резонатор с рабочими модами, получившими название мод шепчущей галереи: $TE_{m\rho 1}$, где $m \gg \rho$. Вывод энергии из такого резонатора осуществляется через его внутреннюю боковую поверхность в полый цилиндрический волновод. Это позволяет разделить ВЧ-волну и электронный пучок, который может быть без помех осажден на разогретую охлаждаемую поверхность коллектора. Кроме использования коаксиального резонатора для селекции рабочей моды предлагается осуществлять ввод внешнего сигнала, возбуждающего ее в резонаторе. Однако наиболее радикальное решение предлагается для устройства вывода энергии. Так как не исключено, что решение этой проблемы традиционными способами может оказаться неудовлетворительным, предлагается использовать систему дифференциальных вакуумных насосов и геттеров для поддержания вакуума в пространстве взаимодействия гиротрона, которое соединяется с камерой реактора трактом, не содержащим окна вывода энергии. Этот проект был опубликован в 1979 г., но до настоящего времени его экспериментальная проверка и расчет рабочих параметров не проводилась.

Основательная проработка различных вариантов построения гиротрона мегаваттного уровня мощности предпринята сотрудниками NRL также в работе [21]. Рассмотрены четыре возможных варианта, отличающихся электродинамическими системами и рабочими модами:

- 1) моды шепчущей галереи;
- 2) высшие симметричные моды;
- 3) многорезонаторные гиротроны (рис.2.3);
- 4) гиротроны с квазиоптическими резонаторами типа Фабри-Перо (рис.2.4).

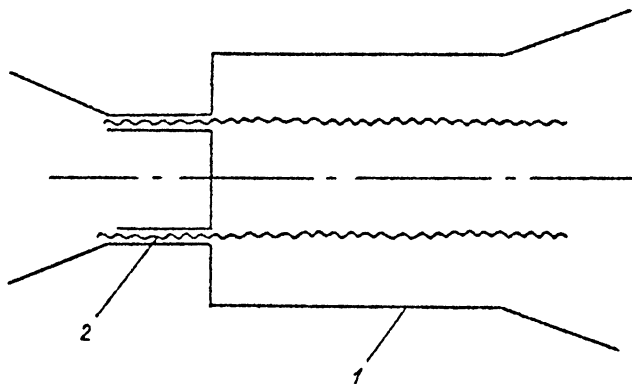


Рис.2.3. Многорезонаторный гиротрон:
1 - основной резонатор TE_{051} ; 2 - коаксиальный резонатор TE_{011}° , группирующий пучок

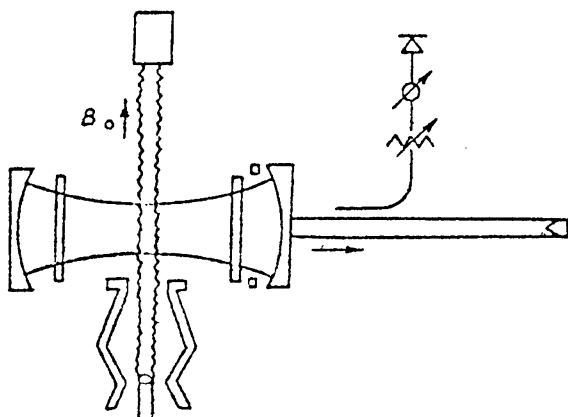


Рис.2.4. Гиротрон с резонатором типа Фабри-Перо

Многорезонаторные гиротроны являются в какой-то степени прообразом появившихся позже гиротронов с резонатором ступенчатого профиля. Эти четыре варианта схем гиротрона анализировались с точки зрения решения проблем отвода тепла от стенок (зеркал) резонаторов, конкуренции мод и формирования винтовых электронных пучков с требуемыми для оптимального режима работы параметрами, а также других особенностей конструкции. Результаты анализа показаны в табл.2.1, взятой из работы [21]. По мнению авторов, все представленные варианты гиротрона на уровень мощности 1 МВт в диапазоне 100 ГГц потенциально жизнеспособны, но требуют для практической реализации проработки по крайней мере одного из узлов, что не позволяет какому-либо из них отдать предпочтение. В работе не рассмотрены проблемы разработки окна вывода энергии и преобразователей мод, способных изменить оценки любого варианта. Тем не менее авторы оптимистически расценивают перспективы появления рабочей схемы такого гиротрона в ближайшие годы в связи с осуществлением программ исследования перечисленных выше проблем [21].

Последующие работы [19,20,45] показали, что использование высших симметричных мод в резонаторах со ступенчатым профилем, по-видимому, способно удовлетворительно решить проблему конкуренции мод. В большей степени остаются не выясненными экспериментально возможности гиротронов, использующих резонаторы Фабри-Перо. Имеются сообщения о демонстрациях гиротронов такого типа. Полученные результаты приближаются к результатам гиротронов со ступенчатым профилем [48].

Компания "Hughes" осуществляет программы создания усилителя на гиро-МВВ диапазона 94 ГГц и генераторов-гиротронов непрерывного

действия в диапазонах 60 и 140 ГГц на уровень мощности 200 кВт [50], предназначенных для нагрева плазмы.

Таблица 2.1

Степень трудности и/или неопределенности решения проблем для разных вариантов гиротрона

Проблема	Вариант			
	TE _{min}	TE _{opt}	Многорезонаторные гиротроны	Гиротроны с квазиоптическими резонаторами
Конкуренция мод	Легкая	Средняя	Средняя/тяжелая	Средняя
Омический нагрев (охлаждение)	Тяжелая	—	Средняя	Легкая
Формирование пучка	Средняя	Тяжелая	—	Средняя
Прочие проблемы	Пучок близок к стенкам	—	Проникновение ВЧ-энергии в пушку	Механизм не исследован экспериментально

В сообщениях о начальных экспериментах указывается [49], что окно вывода энергии имеет конструкцию, аналогичную применяемой фирмой " Varian ". Используются два керамических диска, выполненных из окиси бериллия, охлаждаемых хладагентом FC-75. Испытания в импульсном режиме проведены с окном из окиси алюминия, которое имело длину $5/2 \lambda_c$. В первых экспериментах получена импульсная ВЧ-мощность на уровне 160 кВт с КПД 34,6 % при токе и напряжении пучка 6,6 А и 70 кВ соответственно. Частота генерирования 59,7 ГГц. Отмечается, что работа прибора сопровождалась низкочастотными ВЧ-колебаниями в области пушки на частоте 3,7 ГГц. Эти колебания приводили к интенсивному оседанию электронов на промежуточный анод пушки. Механизм ВЧ-колебаний, по-видимому, гиротронный, так как они подавлялись с помощью настройки магнитного поля в окрестности катода. Характеристики паразитных колебаний исследуются с целью их устранения [49].

В дальнейшем фирма " Hughes " провела работу по усовершенствованию генератора. Испытания гиротрона в диапазоне 60 ГГц в режиме непрерывного генерирования позволили получить мощность около 100 кВт. Этот же прибор в импульсном режиме работы показал 285 кВт при длительности импульса 1 мс и около 200 кВт при длительности импульса 20 нс [50].

Фирма "Thomson CSF" ведет разработку гиротронов-генераторов в диапазоне 35 ГГц и планирует создание гиротронов в диапазонах 70 и 100 ГГц [51-53]. В диапазоне 35 ГГц на рабочей моде TE_{021} в импульсном режиме (7 мс) получена мощность 230 кВт с КПД 36%. Планируется увеличить длительность импульса до 30 мс. Гиротрон диапазона 70 ГГц предполагается использовать в режиме работы на второй гармонике циклотронной частоты. Гиротрон диапазона 100 ГГц должен иметь выходную мощность около 200 кВт и предназначен для экспериментов по нагреву плазмы.

В Массачусетском технологическом институте осуществлены эксперименты с гиротронами диапазона 140 ГГц. В режиме микросекундных импульсов получена мощность свыше 100 кВт [54].

Имеется сообщения о создании в КНР гиротронов, работающих на второй гармонике циклотронной частоты в диапазоне 35-40 ГГц с выходной мощностью около 100 кВт в режиме коротких - до 10 мкс - импульсов.

В Японии исследованиями гиротронов заняты корпорация NEC и университет в Киото [42]. В разработке гиротронов диапазона 35 и 53 ГГц были получены следующие результаты [55]. Гиротрон диапазона 35 ГГц (рабочая мода TE_{011}) имел мощность 168 кВт в режиме импульсов с длительностью 8 мс. Максимальный КПД гиротрона составил 55% при выходной мощности 90 кВт. В этом гиротроне использовался охлаждаемый соленоид, содержащий 10 секций, имеющих независимые источники питания и позволяющих оптимизировать распределение магнитного поля вдоль оси прибора. Максимальный КПД достигался при настройке магнитного поля в области адиабатической компрессии пучка. В гиротроне диапазона 53 ГГц применялся сверхпроводящий соленоид. Рабочая мода TE_{021} . В начальных испытаниях получена выходная мощность 127 кВт при КПД 20%. Максимальный КПД составил 46% при выходной мощности 72 кВт.

В Австралии в университете Сиднея создан гиротрон, перекрывающий диапазон частот от 130 до 260 ГГц с помощью настройки магнитного поля [56]. При этом происходит последовательное возбуждение мод резонатора, для которых оказываются выполненными условия циклотронного резонанса. Уровень мощности около 0,3 Вт. Для этого гиротрона разработано широкополосное окно вывода энергии.

Отдел электронных исследований армии США в сотрудничестве с NRL занимается разработкой гиротрона диапазона 240 ГГц. Согласно данным [57], гиротрон работает на второй гармонике циклотронной частоты. Выходная мощность должна составлять несколько киловатт на рабочей моде TE_{051} .

Для работы гиротронов в миллиметровом диапазоне длин волн обычно требуется применение криомагнитных систем, создающих значительную напряженность магнитного поля. Это неудобно для подвижных развертываемых систем, где более приемлемым считается использование постоянных магнитов [48]. Привлекательной возможностью понижения величины поля является работа на высших гармониках циклотронной частоты [6]. Одна из возможностей реализации такого гиротрона заключается в создании вращающегося подобно твердому телу пучка внутри волновода. Стенки волновода испытывают периодическое по азимуту пространственное возмущение, так же, как это делается в обычном магнетроне [48]. Электроны в течение одного оборота подвергаются периодическому возмущению ВЧ электрического поля, кратность которого равна числу периодов в структуре стенки. В результате становится возможным взаимодействие на частоте, кратной циклотронной частоте электронов, что и позволяет в соответствующее число раз уменьшить напряженность магнитного поля. В 1983 г. экспериментальная лампа, основанная на этом принципе, была создана и испытана в Мэрилендском университете (США). В результате испытаний, проведенных на частоте 4,1 ГГц, на шестой гармонике циклотронной частоты получено 500 Вт импульсной ВЧ-мощности при КПД 4 %. Ток пучка составил около 0,75 А, напряжение 17 кВ. Напряженность магнитного поля в этом диапазоне при работе на шестой гармонике циклотронной частоты соответствует 244 Гс [48]. Этот тип приборов получил название гиромагнетрона или касптрона.

Имеются также сообщения о работе на гармониках циклотронной частоты в гиротронах с резонаторами типа Фабри-Перо. В экспериментах, проведенных в Йельском университете (США), наблюдалось излучение с длиной волны менее 1 мм при напряженности магнитного поля 14 кГс, что соответствует девятой гармонике циклотронной частоты [48].

В 1983 г. в США состоялись также первые испытания гиро-ЛОВ, проведенные в Йельском университете. Использовалась мода TE_{01} круглого волновода в диапазоне 11 ГГц в режиме работы на второй гармонике циклотронной частоты. Максимум выходной мощности составил 1 кВт. Лампа имела перестройку частоты генерирования свыше 10% осуществляющуюся с помощью изменения напряженности магнитного поля [48]. Сообщается о проекте гиро-ЛОВ с перестройкой частоты генерирования в диапазоне 86-103 ГГц. Рабочие параметры: напряжение и ток пучка 35 кВ и 1,3 А соответственно, рабочая мода TE_{01} , напряженность магнитного поля в диапазоне перестройки от 35 до 45 кГс. Согласно оценкам, выходная мощность должна составлять от 1 до 10 кВт. Реализация проекта планируется в Мэрилендском университете США [48]

3. РАЗВИТИЕ ГИРОТРОНОВ-УСИЛИТЕЛЕЙ ЗА РУБЕЖОМ

Гиротроны-генераторы — это приборы, работающие на существова-
но фиксированной частоте. Поэтому они не в состоянии удовлетворять
всем требованиям в таких областях применения электровакуумных при-
боров, как радиосвязи и системы связи [48]. В этих областях,
согласно данным зарубежных источников, перспективными являются
усилители, имеющие большую — от нескольких процентов до нескольких
десятков процентов — мгновенную полосу усиления [48]. Кроме того,
при определенных условиях применение усилителей может оказаться
выгодным в некоторых областях, где ныне используются генераторы.
Известно, что частота и выходная мощность генераторов подвержены
влиянию отражений ВЧ-поля рабочей моды и могут изменяться нежела-
тельным образом при работе на нагрузку, параметры которой непосто-
янны в течение заданного рабочего цикла.

За рубежом развитие усилителей началось практически одновремен-
но с развитием генераторов (1976—1977 гг.), как только была осозна-
на возможность получения сверхвысокого уровня выходной мощности в
миллиметровом диапазоне длин волн, используя сравнительно простые
и эффективные схемы на основе гиротронов. В целом развитие усилит-
телей происходит не менее интенсивно, чем развитие генераторов.
Однако нужно отметить, что, в отличие от последних, сообщений о
практическом применении усилителей пока не имеется, несмотря на то,
что в экспериментах уже достигнут уровень выходной мощности, при-
мерно на порядок превышающий уровень выходной мощности ЛВВ и клист-
ронов О-типа в миллиметровом диапазоне длин волн. Такое положе-
ние связано прежде всего со значительно большими трудностями, ко-
торые необходимо преодолеть на пути создания усилительных схем по
сравнению с генераторными. Как следует из анализа зарубежных источ-
ников, представленного ниже, эти трудности, особенно для широко-
полосных усилителей, связаны с разработкой ввода энергии, а также
с подавлением самовозбуждения нежелательных ВЧ-колебаний и вредно-
го влияния разброса скоростей электронов на КИД схемы — факторов,
наиболее сильно проявляющихся в протяженных электродинамических
системах усилителей.

Среди возможных схем гиротронов-усилителей за рубежом — в ос-
новном в США, где они исследуются особенно интенсивно, — наиболь-
шее развитие получили гиро-ЛВВ. В меньшей степени изучены гирокли-
строны. Сообщений о теоретических и экспериментальных исследовани-
ях других усилителей, например гиротриэтронов или ламп с попереч-
ным током, пока не имеется. Нужно, однако, отметить, что разница
между перечисленными схемами, в гиротронном варианте, меньше, чем

для традиционных СВЧ-приборов 0-типа. Это видно из сопоставления их электродинамических систем, основой которых является слабонерегулярный волновод в режиме работы, близком к отсечке на рабочей моде. Поэтому здесь не исключается возможность использования реке-ных, полученных в одной схеме, для улучшения работы других схем.

Согласно сообщениям зарубежных источников, область применения gyro-LWB предполагаются радиолокация и системы связи, так как здесь требуется усиление в полосе частот от нескольких процентов до нескольких десятков процентов [36, 48]. Интерес к gyroкистро-нам обусловлен в первую очередь возможностью получения высокого - до 70 %, согласно данным, приведенным в работе [11], - КПД и высокого - десятки децибелл - коэффициента усиления [11] в по-лосе частот около 1 % [42, 48]. Считается, что такие усилители могут найти применение в качестве источников ВЧ-энергии для работы будущих поколений линейных ускорителей [48]. Интерес к gyroкистро-нам связан также с проблемой конкуренции мод и увеличения КПД в gyroтрубах-генераторах [26].

3.1. Развитие gyroкистронов

Первая зарубежная разработка gyroкистронов была предпринята фирмой "Varian" в 1977 г. в рамках программы создания источника ВЧ-энергии непрерывного действия в диапазоне 28 ГГц с выходной мощ-ностью около 200 кВт для экспериментов по нагреву плазмы в Ok-Ridex. Одним из вариантов такого источника был двухрезонаторный gyroкистро-н. Не исключено, что сложная gyroкистроновая схема была выбрана в расчете на высокий КПД, так как это позволяло уменьшить мощность пучка и удельные нагрузки на поверхности коллектора. Согласно рас-четам, КПД схемы мог достигать 44 % при выходной мощности 280 кВт [42]. Во входном и выходном резонаторах gyroкистронов использо-вались симметричные рабочие моды TE_{011} и TE_{021} соответственно. Вход-ной резонатор имел уменьшенный диаметр. Разработка gyroкистронов отличалась с серьезными трудностями. В первом варианте прибора, испытанном в импульсном режиме, не удалось получить усиление выше 13 дБ, так как этому препятствовало возникновение самовозбуждения ВЧ-колебаний, которое наблюдалось на частотах 26,9 и 27,4 ГГц. Са-мовозбуждение паразитных мод TE_{21} и TM_{11} удалось подавить после внесения поглотителей в трубку дрейфа и в область формирования пуч-ка в окрестности входного резонатора. В итоге усиление составило 40 дБ, однако максимальный КПД был только 9 % при выходной мощ-ности 50 кВт, а максимальная выходная мощность не превышала 65 кВт. Предполагается, что несоответствие результатов испытаний и резуль-

татов расчета обусловлено влиянием ВЧ-поля пространственного заряда и разброса скоростей электронов на процесс группирования пучка в трубке дрейфа [7, 42]. Разработанный вариант гиросцистрона имел полосу усиления 0,2 %. Эксперименты предполагалось продолжать, но дальнейших сообщений о них не последовало.

В рамках второй программы фирмы "Varian", направленной на создание усилителя в диапазоне 94 ГГц, о которой уже упоминалось, также были проведены исследования как гиросцистронов, так и гиросБВ. Теоретическая проработка вариантов этих схем, использующих различные моды на основной и высших гармониках циклотронной частоты, осуществлялась в тесном сотрудничестве с NRL [7]. Одним из вариантов был трехрезонаторный гиросцистрон, работавший на второй гармонике циклотронной частоты и испытанный в диапазоне частот 8-12 ГГц [7]. Его рабочие параметры не приведены. Испытания закончились неудачно из-за появления мощного самовозбуждения паразитных колебаний в диапазоне 4-8 ГГц, по-видимому, на первой гармонике циклотронной частоты, которые сильно влияли на условия формирования пучка. Отмечается, что расчетная величина энергии вращения электронов - 43 % от полной энергии - скорее является цифрой, основанной на данных о распределении электрического и магнитного поля в области формирования пучка, чем величиной, в действительности характеризующей его параметры. Выходная мощность и КПД гиросцистрона оказались намного ниже ожидаемых значений, что, с одной стороны, связано с малой величиной энергии вращения электронов, а с другой, могло быть обусловлено действием ВЧ-поля пространственного заряда, которое не учитывалось в расчетах [7].

Этот гиросцистрон предназначен для использования в РЛС [7], поэтому в процессе его исследования были проведены измерения уровня шума и спектра выходного сигнала, показанного на рис. 3.1. Сопоставление спектров входного и выходного сигналов, полученное в режиме работы с длительностью импульсов 1,5 мкс и частотой повторения 1000 импульсов в 1 с, позволяет считать результаты типичными для мощных усилителей 0-типа. Измеренный уровень шума - от 50 до 60 дБ - также типичен для мощных усилителей. По мнению специалистов фирмы "Varian", гиросцистроны не выделяются в этом смысле среди прочих усилителей 0-типа [7]. Вероятно, в рамках указанной программы были сделаны и оценки полосы усиления гиросцистронов, согласно которым она лежит на уровне 1 % [42]. Сообщения фирмы "Varian" о последних экспериментальных и теоретических исследованиях гиросцистрона не появлялись в зарубежных источниках. Известно, однако, что данная программа успешно развивалась в дальнейшем на основе гиросБВ [48].

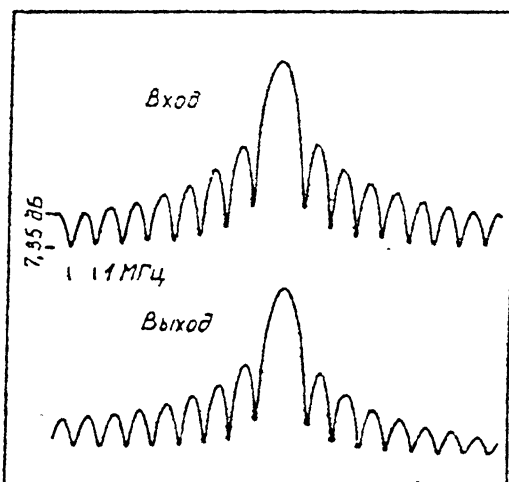


Рис.3.1. Сравнение спектров входного и выходного сигналов

После этих неудачных попыток в США некоторое время отсутствовали сообщения о ведущихся теоретических или экспериментальных исследованиях в области гироспистронов. Полоса затишья длилась до 1981 г., когда вновь стали появляться работы, посвященные этой тематике [26,27]. В статье [26] представлена обстоятельная теория усиления в двухрезонаторном гироспистроне в режиме насыщения мощности, позволяющая определить КИД при заданных амплитудах ВЧ-поля и соответствующие параметры резонаторов в зависимости от выбора параметров пучка. Эта теория использована для расчета оптимальных параметров двухрезонаторной схемы, работающей как в режиме усиления, так и в режиме генерирования в зависимости от настройки напряженности однородного магнитного поля в пространстве взаимодействия. Исследовался вариант с рабочими модами TE_{011} и TE_{041} во входном и выходном резонаторах соответственно. Круг рассмотренных вопросов, однако, в большей степени касается проблематики увеличения КИД и стабильности генераторов, чем собственно гироспистронов, и имеет непосредственное отношение к разработке гиротрона в диапазоне 35 ГГц с рабочей модой TE_{041} , которая в то время проводилась в NRL. Подробно анализируются вопросы конкуренции мод TE_{041} и TE_{241} в выходном резонаторе. Отмечено существенное улучшение стабильности работы такого варианта гиротрона по сравнению с гироспистроном, а также возможность увеличения КИД. Улучшение стабильности достигается за счет самовозбуждения ВЧ-колебаний во входном резонаторе, где конкуренция мод TE_{011} и TE_{211} слабая. Режим выбирается таким образом, чтобы амплитуда ВЧ-поля была малой.

Промодулированный симметричной модой пучок группируется в трубке дрейфа и поступает в выходной резонатор, обеспечивая увеличение КИД и стабильное возбуждение рабочей моды TE_{041} . Уже отмечалось, что аналогичная идея [19,20] получила убедительное подтверждение в экспериментах с пиротроном, резонатор которого имел ступенчатый профиль. В последнем случае ВЧ-колебания в резонаторах являются связанными электродинамически. Привлекательная сторона гибридной схемы — отсутствие влияния отражения рабочей моды от нагрузки на частоту самовозбуждающихся колебаний, однако она, возможно, обеспечивает меньшую степень подавления конкурирующих мод.

Было исследовано влияние разброса скоростей электронов на КИД рассматриваемой схемы [26]. Отмечено, что в оптимальных режимах работы разброс скоростей электронов приводит к сильному уменьшению КИД, которое тем заметнее, чем длиннее трубка дрейфа. Чувствительность гибридного варианта генератора к разбросу скоростей электронов также является недостатком по отношению к схеме с резонаторами ступенчатого профиля. Сообщений об экспериментальных исследованиях гибридного пиротрона не имеется.

Работа [27] посвящена готовящемуся в NRL эксперименту с трехрезонаторным гибридным пиротроном (рис.3.2). Рабочие параметры гибридного пиротрона были рассчитаны с помощью теории, развитой в работе [26]. Эксперимент предполагается осуществить в диапазоне 4,5 ГГц с последующим масштабированием в миллиметровый диапазон. Напряжение и ток пучка составят 60 кВ и 5 А соответственно. Предполагается получить около 100 кВт ВЧ-мощности при КИД не менее 35 % и усиление свыше 40 дБ в режиме малого сигнала и 33 дБ в насыщенном режиме. В качестве рабочей моды выбрана TE_{101} -мода прямоугольного волновода. Отношение размеров стенок в поперечном сечении равно 0,95. Выбор нижней моды прямоугольного волновода обусловлен желанием избежать проблем, связанных с возникновением паразитной генерации в трубках дрейфа и резонаторах, а также от проблемы работы с выродившимися модами, возникающей при выборе нижней рабочей моды круглого волновода TE_{111} . Целью эксперимента является:

- а) сопоставление данных для усиления в двухрезонаторном гибридном пиротроне в режиме слабого сигнала с теоретическими;
- б) исследование влияния настройки собственных частот резонаторов на усиление и КИД;
- в) исследование влияния вариаций магнитного поля на усиление и КИД.

В связи с поставленными задачами в экспериментальном образце гибридного пиротрона в каждом резонаторе планируется обеспечить связь с внешними трактами. Кроме того, резонаторы будут иметь устройство для настройки собственных частот с помощью перемещения узкой стенки.

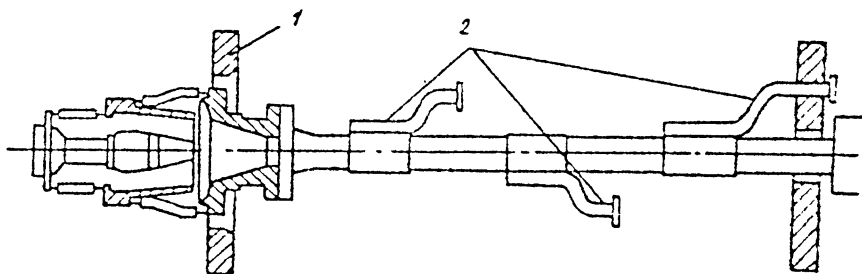


Рис.3.2. Схема трехрезонаторного гиросистрона:
1 - полюсный наконечник; 2 - волноводы связи с резонаторами

Длины резонаторов электродинамической системы $0,9$ и $1,1 \lambda_0$, где λ_0 — длина волны в свободном пространстве; длина трубки дрейфа $1,5 \lambda_0$. Здесь приведены параметры каскада усилителя, который предполагалось исследовать вначале. Однако из-за нехватки мощности задающего генератора добавлен каскад с такой же длиной трубки дрейфа. Параметры промежуточного и выходного резонаторов, по-видимому, одинаковые. Коэффициент усиления каскада в насыщенном режиме составляет $12,7$ дБ при 20 дБ в режиме слабого сигнала. Отмечается, что высокий КПД схемы (около 40%) достигается при малой (6%) величине разброса поступательных скоростей электронов. Сообщений о результатах эксперимента пока нет.

3.2. Развитие гиросистронов

Гиросистроны, согласно оценкам [48], уступают гиросистронам по достигнутой величине выходной мощности, КПД и коэффициента усиления. Они, однако, могут работать в значительно более широкой полосе частот без какой-либо перестройки параметров [42]. Большая мгновенная полоса усиления позволяет использовать их в РЛС, системах связи и РИД миллиметрового диапазона длин волн [7,42,48]. Этим обусловлен повышенный интерес зарубежных, главным образом в США, фирм и исследовательских лабораторий к гиросистронам. Практически разработками в диапазоне 94 ГГц заняты фирмы "Varian" и "Hughes" по контрактам с Римским центром развития авиации и с Лабораторией военно-воздушных сил США соответственно. Большая исследовательская работа по расширению полосы усиления гиросистронов диапазона 35 ГГц проводится сотрудниками NRL.

Характерной особенностью является акцент на получении широкополосного усиления — от нескольких процентов до десятков процен-

тов - в то время как уровень выходной мощности остается относительно невысоким - в пределах десятков киловатт [31, 32, 42, 48, 58-60]. Рассмотрим результаты и наиболее перспективные направления развития этих исследований.

Сирма "Varian" в сотрудничестве с NRL на основе развитой герми [43] разработала проект gyro-TWT в диапазоне 5 ГГц, который в будущем предполагалось масштабировать в диапазон 94 ГГц в соответствии с программой исследований gyroусилителей [7]. В 1979 г. были проведены первые испытания [24]. В ходе этих испытаний была получена ВЧ-мощность 45 кВт при коэффициенте усиления 23 дБ и КПД 15 %. Многочастотная полоса частот в режиме слабого сигнала составила 3 %, а в насыщенном режиме достигала 6 %. Сообщалось,

что в планы исследований входит получение мощности 100 кВт в диапазоне 94 ГГц. Более полная информация об этих экспериментах, а также об их продолжении содержится в работе [58]. В ней сообщается об испытаниях трех ламп, отличающихся в существенных чертах длиной пространства взаимодействия и применением распределенного поглощения ВЧ-энергии. Длина пространства взаимодействия в первой лампе 20,3 см при частоте отсечки 4,8 ГГц. Соответствующая длина во второй и третьей лампах достигала 43,2 см при частотах отсечки 4,8 и 5 ГГц. В третьей лампе внутренняя поверхность цилиндрического волновода была покрыта тонким слоем поглотителя на протяжении первых двух третей его длины. Потери ВЧ-мощности на рабочей моде TE_{11} составляли 6-10 дБ. Конструкция лампы приведена на рис.3.3. В качестве ввода ВЧ-сигнала использовались два прямоугольных волновода, позволяющих возбуждать рабочую моду с требуемым направлением круговой поляризации. Подробности устройства ввода ВЧ-сигнала не указаны. Во всех трех лампах фор-

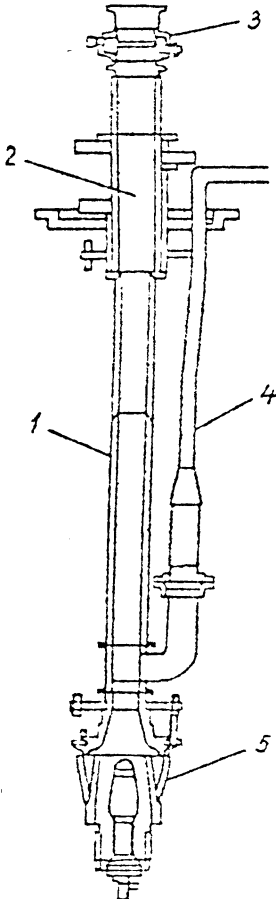


Рис.3.3. Схема gyro-TWT:
1 - пространство взаимодействия;
2 - коллектор; 3 - окно;
4 - входной волновод; 5 -
электронная пушка

мирование электронного пучка осуществлялось с помощью магнетронной инжекционной пушки, рассчитанной на режим работы с напряжением 60 кВ и током 5 А при отношении скорости вращения электронов к скорости поступательного движения примерно 1,5.

Коэффициент усиления в устойчивом режиме работы для первой лампы составил 3 дБ. Попытки его увеличения с помощью настройки напряженности магнитного поля приводили к появлению паразитного генерирования на рабочей моде. Частота генерирования лампо перестраивалась в диапазоне 4,8–5,2 ГГц при увеличении напряженности магнитного поля. Генерируемая мощность изменялась от 1 до 2 кВт. В пониженном магнитном поле происходило генерирование на частотах 8,05 и 8,55 ГГц, которое, по-видимому, появлялось в результате самовозбуждения колебаний моды TE_{21} на второй гармонике циклотронной частоты.

Во второй лампе, отличавшейся от первой длиной пространства взаимодействия, наблюдалась аналогичная картина, причем мощность паразитных ВЧ-колебаний на рабочей моде в выходном волноводе достигала 40 кВт при мощности в пучке 300 кВт, а во входном — 4 кВт. Коэффициент усиления в устойчивом режиме работы не превышал 17 дБ и имел осциллирующую зависимость от частоты. Максимальная мощность в режиме насыщения была на уровне 11–13 кВт.

Применение поглощающих материалов в третьей лампе позволило радикально улучшить ее работу. Коэффициент усиления в режиме слабого сигнала достигал 24 дБ, а в насыщенном режиме — 18 дБ. Выходная мощность составила в максимуме 50 кВт при КПД 16,6 % и полосе усиления 6 % по уровню —3 дБ. В более поздних экспериментах выходная мощность была доведена до 120 кВт, а КПД до 26 % с помощью настройки распределения магнитного поля в области формирования пучка. Напряжение и ток пучка при этом составили 65 кВ и 7 А соответственно. Отмечается, что для масштабирования результатов в диапазон 94 ГГц проведена разработка электронно-оптической системы.

Проблемы разработки пушки для gyro-LWB диапазона 94 ГГц были весьма острыми, что заставило фирму "Varian" обратиться к исследованию других вариантов формирования пучка. В докладе Фергюсона и Симонса [59] на международной конференции в Вашингтоне в конце 1981 г. представлены результаты серии экспериментов с той же gyro-LWB, имевшей пушку, работающую в режиме ограничения эмиссии пространственным зарядом. Авторы отмечают следующие проблемы, возникающие при разработке магнетронно-инжекционной пушки для gyro-LWB диапазона 94 ГГц. Масштабированный волновод имеет малый диаметр и для обеспечения оптимального сопротивления связи при работе на моде TE_{11} пучок должен следовать как можно ближе к его оси. Это приводит к существенному увеличению плотности тока и заряда, а также

к увеличению разброса скоростей электронов [59]. Нужно отметить, что прямое масштабирование электронно-оптической системы из диапазона 5 ГГц в диапазон 94 ГГц практически невозможно из-за непреодолимого увеличения плотности тока и напряженности электрического поля на поверхности эмиттера. Режим ограничения эмиссии температурой имеет недостатки, ухудшающие характеристики усилителей, предназначенных для использования в РЛС и системах связи. К ним относятся увеличение уровня шума примерно на 15 дБ по сравнению с ЛБВ 0-типа и нарушение линейности фазы наряду с уменьшением возможностей амплитудной и фазовой модуляции. Характер последних эффектов не поясняется. Уровень шума измерялся экспериментально в рассматриваемой гиро-ЛБВ [59] и был на 50 дБ выше уровня теплового шума, в то время как в ЛБВ 0-типа типичным является превышение на 35 дБ [59].

Была разработана и испытана конструкция, содержащая пушку Пирса для формирования тонкого осевого пучка электронов, которому затем придавалось вращение в магнитном поле, наложенном на магнитное поле рассеяния основного соленоида и создаваемом бифилярной спиралью (рис.3.4). Система такого рода предложена в работе [62] и использовалась ранее Уиршфилдом [16] и Боттом [63]. Для данного эксперимента авторы провели оптимизацию ее длины и других параметров, что позволило получить тонкий, спиралевидный пучок, имеющий разброс скоростей вращения электронов не более 0,35 при отношении скорости вращения к скорости поступательного движения примерно 1,5. Эта электронно-оптическая система была испытана в гиро-ЛБВ диапазона 5 ГГц. Получено 64 кВт выходной мощности при КПД 14 %

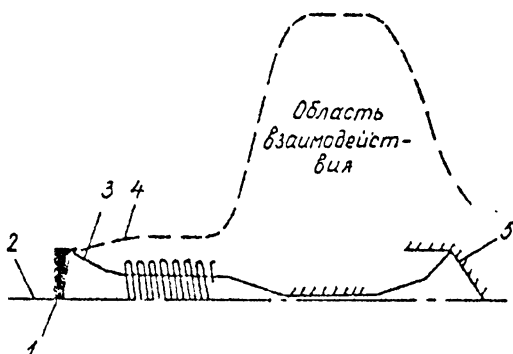


Рис.3.4. Гиро-ЛБВ с пушкой Пирса и бифилярной спиралью:

1 - катод; 2 - ось прибора; 3 - граница пучка; 4 - распределение магнитного поля на оси прибора; 5 - коллектор

против 120 кВт и 26 %, достигнутых с магнетронно-инжекторной пучкой. Напряжении 65 кВ и ток пучки 7 А были одинаковыми и в том и в другом случае. Измерения уровня шума не приводятся. Информация о дальнейшем ходе разработки gyro-MEB диапазона 94 ГГц отсутствует. Сообщается, что такая gyro-MEB была испытана фирмой "Varian" в 1983 г. и имела мощность выше 20 кВт при полосе усиления 2 % по уровню -3 дБ. Коэффициент усиления и КПД лампы составляют 30 дБ и 8 % соответственно [48], рабочая мода TE_{11} . Прочие характеристики лампы не опубликованы.

Фирма "Hughes" начала разработку gyro-MEB диапазона 94 ГГц в 1981 г. [49]. Целью разработки является достижение усиления в полосе частот 4 % при импульсной выходной мощности 10 кВт и средней мощности 5 кВт. Требуемое усиление около 17 дБ. К концу 1981 г. был изготовлен первый опытный образец лампы с рабочей модой TE_{01} в расчете на напряжение 26,9 кВ и ток пучки 1,3 А. В gyro-MEB применяется магнетронно-инжекторная пучка с плотностью тока эмиссии 6 A/cm^2 и электродинамическая система - цилиндрический волновод длиной 6 см, имеющий частоту отсечки 91 ГГц на рабочей моде TE_{01} . Ввод сигнала предполагается осуществлять от стандартного волновода прямоугольного сечения. Устройство ввода имеет конструкцию, разработанную и применявшуюся ранее в NRL для gyro-MEB диапазона 35 ГГц. Однако в первой лампе устройство ввода вообще не используется в связи с трудностями изготовления и неопределенностью параметров задающего генератора. Ее предполагается испытать в режиме генерирования. Разработанный коллектор имеет внутренний диаметр 2,6 см и рассчитан на полную мощность пучки 35 кВт. Сообщений о результатах испытаний gyro-MEB не имеется.

Первый проект gyro-MEB диапазона 35 ГГц был опубликован NRL в 1977 г. [64]. Предполагалось получить мощность около 300 кВт с КПД 54 % на рабочей моде круглого волновода TE_{01} . Напряжение пучка 70 кВ, ток до 10 А. Разработка проекта осуществлялась с помощью теории усиления в режиме большого сигнала, разветкой Спренглом и Дроботом [65]. Электронно-оптическая система содержала магнетронно-инжекторную пучку, работающую в режиме ограничения эмиссии температурой, параметры которой оптимизировались на ЭВМ с целью уменьшения разброса поступательных скоростей электронов [66, 67].

В 1979 г. состоялись первые испытания gyro-MEB, показавшие, что входной и выходной узлы связи и окно ввода энергии требуют существенной доработки [18]. Отражение рабочей волны на выходе лампы препятствовало измерениям полосы усиления, а потери мощности на входе и значительное уменьшение коэффициента усиления, который не превышал 17 дБ из-за 15 % разброса поступательных скоростей электронов, не позволяли ввести ее в насыщенный режим. Максимум выходной мощности оставил 10 кВт в импульсном режиме.

В том же 1979 г. были проведены испытания gyro-ЛБВ, не имевшей указанных ограничений по входному и выходному узлам связи [18]. В электронно-оптической системе изменения не вносились. Длина электродинамической системы была увеличена с 17 до 21 см (длина соответствует протяженности области однородного магнитного поля). Сна не содержала поглощающих ВЧ-энергию материалов. Радиус волновода составлял 0,533 см. Резонансное окно вывода энергии заменили на тонкий диск слюды диаметром 1,6 см и толщиной примерно 0,025 мм. Коэффициент отражения от окна по мощности, согласно измерениям, не превышал 25 дБ в диапазоне от 34 до 36 ГГц. Сопряжение электродинамической системы с выходным волноводом было реализовано с помощью конуса длиной 10 см, имеющего входной диаметр 10,66 мм и выходной — 16 мм.

Наиболее радикальные изменения были внесены во входной узел связи. Прототипом служило устройство [68], обеспечивающее связь моды TE_{01} коаксиального волновода с модой TE_{01} цилиндрического волновода. В рассматриваемой разработке связь этих мод осуществлялась посредством плоского рефлектора (рис.3.5), причем расстояние d удовлетворяло условию $(K_{01} - K_{02})d = \pi/2$, где K_{01} и K_{02} — постоянные расщепления моды TE_{01} и TE_{02} в области I. Радиус стенки узкого волновода соответствует полю ВЧ-поля моды TE_{02} в области I. Рефлектор содержит отверстие для ввода электронов в пространство взаимодействия, диаметр которого мал и не приводит к существенным изменениям режима работы. Присутствие отверстия несколько изменяет оптимальное значение длины d . Данное устройство ввода обеспечивало связь в полосе частот 3,5 ГГц, причем коэффициент отражения по мощности не превышал 15 дБ и имел плавную зависимость от частоты в диапазоне от 34,6 ГГц (на 300 МГц выше частоты отсечки рабочей моды) до 39,1 ГГц [18]. Формирование моды TE_{01} в коаксиальном волноводов осуществлялось с помощью двух коаксиальных секторов, образованных расширяющимися прямоугольными волноводами. Прямоуголь-

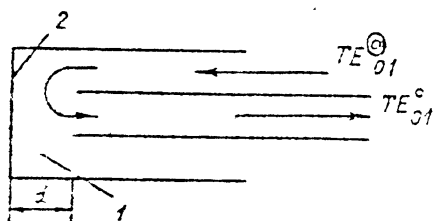


Рис.3.5. Узел связи волн $TE_{01}^{\text{с}}$ и $TE_{01}^{\text{с}}$:

I — область; 2 — рефлектор

ный волновод сначала разветвлялся с помощью стенки, перпендикулярной силовой линии электрического поля, а затем каждый из волноводов расширялся в направлении стенки, параллельной силовой линии электрического поля. Расширение сопровождалось изгибом стенки, в результате чего образовывались два сектора по 180° каждый, сопрягавшихся с коаксиальным волноводом. Структура

ВЧ-часть в секторах соответствовала моде TE_{011} . Разработанный узел ввода энергии был использован также фирмой " Hughes " для gyro-ЛВБ диапазона 94 ИТч с рабочей модой TE_{011} . В ходе испытаний gyro-ЛВБ входная мощность изменялась в пределах от 0,2 Вт до 2 кВт. Развязка задающего генератора (магнетрона) с нагрузкой обеспечивалась аттенуатором, имевшим большой коэффициент ослабления. В режиме слабого сигнала был получен коэффициент усиления 32 дБ при токе пучка 9 А и 24 дБ при токе пучка 3 А. В насыщенном режиме максимум выходной мощности составлял 26 кВт при усилении 13 дБ и КЦД 3,6 % (ток 9 А). Максимальный КЦД 7,8 % был получен при токе 3 А. Усиление соответствовало 20 дБ при выходной мощности 16,6 кВт. Полоса усиления в режиме слабого сигнала измерялась по половинному уровню максимальной выходной мощности (-3 дБ). Для тока пучка 3 А и максимального коэффициента усиления 24 дБ она составила 500 МГц. Измерения полосы усиления в насыщенном режиме не проводились из-за отсутствия широкополосного задающего генератора с большим уровнем мощности. Напряжение пучка во всех измерениях было равно 70 кВ. Режим работы gyro-ЛВБ очень чувствителен к изменению положения электронной пушки в магнитном поле. Большая чувствительность параметра $\alpha = v_{\perp} / v_{\parallel}$ и величины разброса скоростей электронов к положению пушки следует также из результатов расчета электронно-оптической системы на ЭВМ. Отмечено, что экспериментальные данные коррелирует с расчетными для тока 3 А при радиусе пучка 2,5 см, отношении α скорости вращения v_{\perp} к скорости поступательного движения v_{\parallel} , равном 1,5, и величине разброса поступательных скоростей электронов 17,7 %. Подробное сопоставление экспериментальных и расчетных данных было затруднено из-за отсутствия информации об истинных параметрах пучка и очевидной чувствительности его качества к режиму работы пушки, т.е. к напряжению, величине тока пучка, настройке магнитного поля и положению пушки относительно соленоида. Предполагается, что параметр $\alpha = v_{\perp} / v_{\parallel}$ в эксперименте не достигал расчетной величины. Расчет предсказывал также более слабую зависимость КЦД от величины напряженности магнитного поля по сравнению с наблюдавшейся экспериментально. Максимальный коэффициент усиления соответствовал напряженности магнитного поля 12,8 кГс (для тока пучка 3 А). Расчетный максимум усиления соответствует 13,06 кВ, что на 2 % выше экспериментального значения. Для этих эффектов убедительного объяснения не найдено [18].

В планы ближайших экспериментов входило усовершенствование пушки с целью уменьшения разброса скоростей электронов, постановка работ по gyro-ЛВБ с удлиненной электродинамической системой, содержащей поглощающие ВЧ-энергию материалы, измерения полосы усиления в насыщенном режиме и серия экспериментов с несимметричным магнитным

полем в пространстве взаимодействия. Намечалось работы по дальнейшему усовершенствованию электродинамической системы, особенно элементов связи [18].

Позже МЛГ провела обстоятельное теоретическое исследование самовозбуждения нежелательных ВЧ-колебаний в gyro-ЛЭВ [29]. Согласно работе [29], в рассматриваемой gyro-ЛЭВ наблюдалось самовозбуждение ВЧ-колебаний, имеющих различные механизмы возникновения обратной связи. Один из них обусловлен отражением усиливаемой рабочей (или паразитной) волны от угла вывода энергии — так называемая внешняя связь [18]. Другой имеет в своей основе взаимодействие с встречной волной, возникающее при достаточно сильной связи пучка и ВЧ-поля рабочей волны [29]. Характерной чертой последнего механизма — абсолютной неустойчивости — является самовозбуждение рабочей волны на частоте, чем-то ниже частоты отсечки волновода [29]. Разброс скоростей электронов практически не влияет на стартовые условия абсолютной неустойчивости, в то время как уменьшение проводимости от них волновода способно привести к значительному улучшению стабильности gyro-ЛЭВ.

В работе [29] приведено сопоставление экспериментальных и расчетных данных для пучка с параметрами $v_1 = 0,4c$ и $v_{II} = 0,27c$, где c — скорость света. В эксперименте самовозбуждение ВЧ-колебаний возникло на частотах 34,38; 34,45 и 34,27 ГГц при частоте отсечки 34,3 ГГц. Колебания на частотах 34,38 и 34,45 ГГц связаны с резонансным увеличением коэффициента отражения рабочей волны от угла вывода энергии, которое наблюдалось на холодных измерениях. ВЧ-колебания самовозбуждались при следующих условиях. Для напряженности пучка 70 кВ, тока 1 А и напряженности магнитного поля 12,81 кГс на рабочей частоте 35,13 ГГц был достигнут максимум коэффициента усиления 12,7 дБ с выходной мощностью 1230 Вт. При увеличении напряженности магнитного поля коэффициент усиления быстро уменьшался до нуля при 13,11 кГс. Самовозбуждение ВЧ-колебаний на частоте 34,45 ГГц возникало при напряженности магнитного поля 13,15 кГс с выходной мощностью 8,71 кВт, что весьма близко к выходной мощности, наблюдающейся в насыщавшем режиме — 5,75 кВт. При увеличении магнитного поля генерирование ВЧ-колебаний на частоте 34,45 ГГц продолжалось вплоть до 13,37 кГс, где они исчезали и возникало самовозбуждение колебаний на частоте 34,27 ГГц с выходной мощностью 200 Вт. Дальнейшее увеличение напряженности магнитного поля сопровождалось паразитным ростом мощности колебаний, достигавшей 660 Вт при 13,41 кГс. Колебания на частоте 34,27 ГГц интерпретируются как проявление абсолютной неустойчивости. Наиболее перспективный способ подавления обоих типов самовозбуждения паразитных колебаний состоит в обеспечении распределенного поглощения ВЧ-энергии в стенках вол-

новода, что позволяет сохранить коэффициент усиления на достаточно высоком уровне, повысить стартовый ток для любого типа неустойчивости и получить равномерную зависимость коэффициента усиления от частоты вблизи отсечки волновода [29].

Влияние проводимости стенок волновода и разброса скоростей электронов на характеристики ЛБВ обстоятельно исследовано в работе [69]. Основные выводы анализа состоят в следующем. Небольшые потери ВЧ-энергии в стенках, характеризующиеся величиной отношения δ/r_w (здесь δ - глубина скин-слоя, r_w - радиус волновода) - примерно несколько единиц на тысячу, незначительно уменьшают коэффициент усиления. Отраженная волна подавляется гораздо сильнее, чем усилываемая. Это обеспечивает возможность стабилизации режима работы. Потери ВЧ-энергии в стенках волновода позволяют существенно увеличить полосу усиления при выполнении условий синхронизма касания. При меньшей напряженности магнитного поля этот эффект невелик. Расширение полосы происходит в области низких частот, во-первых, из-за оглаживания амплитудно-частотной характеристики, во-вторых, из-за расширения области усилываемых частот за пределы частоты отсечки.

Согласно оценкам [69], оптимальный режим работы gyro-ЛБВ достигается при проводимости стенок, соответствующей величине отношения δ/r_w - около 0,005, и значению напряженности магнитного поля примерно на 2 % меньшем, чем значение, реализуемое при выполнении условий синхронизма касания. Параметры пучка отвечают условиям эксперимента, приведенным выше.

В продолжение программы исследования gyro-ЛБВ в KRL испытана лампа с длиной пространства взаимодействия 43 см [30]. На внутреннюю стенку волновода был нанесен поглотитель. Ее проводимость соответствовала величине отношения $\delta/r_w = 0,0026$. Полоса усиления в режиме слабого сигнала достигала 3,4 % (1,2 ГГц). Она измерялась по уровню -3 дБ от максимального коэффициента усиления, составлявшего 26 дБ при токе пучка 1 А. Информация о дальнейшем ходе разработки этой gyro-ЛБВ не появлялась.

В 1981 г. NRL опубликовала теорию и результаты первых испытаний схемы gyro-ЛБВ, в которой было получено усиление в полосе частот около 12-13 % - диапазон от 33 до 37,5 ГГц. В обзорном докладе [42] представителя фирмы " Varian " отмечается важность работ в области расширения мгновенной полосы усиления gyro-ЛБВ. Эти работы развивались по трем направлениям. Были исследованы возможности использования периодических электродинамических систем, однородных систем с диэлектриком и систем с изменяющимся вдоль пространства взаимодействия диаметром волновода. В периодических системах, согласно оценкам, возможно достижение полос усиления

20-50 %. Недостаток направления - повышенная трудность изготовления электродинамической системы, хотя она и должна быть проще, чем в ЛВБ 0-типа [42].

Однородный волновод с диэлектрическим наполнением был объектом серьезного исследования в NRL и Йельском университете. По оценкам, полоса усиления должна быть порядка октавы. Недостатками направления является проблема оледенения электронов на диэлектрик, возрастание трудностей изготовления и тепловые ограничения, обусловленные потерями ВЧ-энергии в диэлектрике [42].

Гиро-ЛВБ с конечным волноводом представляет третье направление. Она также была изучена в NRL. Как показали ее испытания, конечный волновод - удачная схема для получения широкополосного усиления [42].

Теория гиро-ЛВБ с распределенным взаимодействием опубликована в работах [32,34]. Рассматривается схема, в которой волновод расширяется, а напряженность магнитного поля уменьшается в направлении движения электронного пучка. Расширение волновода происходит в достаточной степени медленно, так что можно говорить о локальной постоянной распространения рабочей волны, зависящей от продольной координаты z и частоты усиливаемого сигнала ω . Доплеровская частота волны ω_d также является функцией частоты сигнала и координаты z . При фиксированной частоте сигнала эта функция монотонно убывает с ростом координаты z . Максимум доплеровской частоты равен частоте сигнала и достигается в сечении, для которого выполняется условие $\omega = \omega_0(z, \omega)$, где $\omega_0(z)$ - частота отсечки, зависящая от z . Условия синхронизма электронов с волной на частоте ω будут удовлетворены в области, составляющей часть длины пространства взаимодействия, если циклотронная частота $\omega_H(z)$ близка к доплеровской частоте $\omega_d(z, \omega)$. Анализ зависимости $\omega_d(z, \omega)$ от ω при фиксированной координате z показывает, что она имеет минимум $\omega_{dmin}(z) = \omega_0(z) \sqrt{1 - \beta_H^2(z)}$, где $\beta_H(z) = v_H^2(z)/c$. Этот минимум достигается при значении $\omega(z) = \omega_0(z) / \sqrt{1 - \beta_H^2(z)}$.

Функция $\sqrt{1 - \beta_H^2(z)}$ изменяется медленно по сравнению с $\omega_0(z)$ и, следовательно, $\omega(z)$ монотонно убывает с ростом z . Поэтому семейство кривых $\omega_d(\omega, z)$, где ω рассматривается как параметр, имеет огибающую $\omega_{dmin}(z)$. Если теперь выбрать зависимость $\omega_H(z)$, удовлетворяющую соотношению $\omega_H(z) = \omega_{dmin}(z) = \omega_0(z) \sqrt{1 - \beta_H^2(z)}$, то для каждой частоты ω условия синхронизма реализуются в сечении z , зависящем от выбора ω . Иначе говоря, с уменьшением ω область синхронизма смещается в направлении увеличения z [32,34]. Длина, на которой условия синхронизма можно считать выполненными, пропорциональна длине волновода и обратно пропорциональна разнице между максимальным и минимальным радиусами. Полоса усиления пропор-

плоскостные разности максимального и минимального радиусов. Высокий коэффициент усиления в заданном диапазоне частот можно получить, увеличивая длину волновода и подбирая соответствующее распределение магнитного поля [34]. Согласно оценкам, сделанным в работах [32, 34], в таких схемах возможно получение полосы усиления порядка одной или нескольких октав. Достоинство схемы — слабая чувствительность усиления к разбросу скоростей электронов, обусловленная взаимодействием электронов с волной вблизи частоты отсечки $\omega_0(z) \approx \omega$. Предполагается также, что схема устойчива по отношению к возбуждению на встречной волне из-за отсутствия таких областей пространства взаимодействия, для которых выполняются соответствующие условия синхронизма [32, 34].

Одной из серьезных проблем, возникающих в gyro-MEB с распределенным взаимодействием, является проблема ввода усиляемого сигнала. Традиционный способ здесь неприемлем, так как устройство ввода, расположенное в узком сечении волновода, не в состоянии обеспечить связь электродинамической системы и входного тракта на частотах ниже частоты отсечки узкого сечения волновода. В устройстве ввода связь конического волновода с внешним трактом осуществляется посредством совокупности резонансных фильтров [32], но оно весьма сложно в техническом исполнении. Наиболее простой способ ввода со стороны широкого конца волновода рассмотрен в работе [34]. При этом волна, распространяющаяся навстречу электронному пучку, не претерпевает усиления до тех пор, пока не отразится от сечения волновода, в котором ее частота равна частоте отсечки. Проблемой является развязка задающего генератора с усиленной волной. В работе [70] рассмотрен способ развязки, использующий свойство винтовых пучков осуществлять связь вырожденных мод или мод, имеющих близкие критические частоты, если этому не препятствует симметрия. В частности, в волноводе с сечением, близким к квадратному, винтовой пучок, взаимодействуя с волной TE_{10}^a , будет возбуждать волну TE_{01}^a . Предлагается [70] выполнить условия синхронизма, например, с волной TE_{01}^a , а входной сигнал на волне TE_{10}^a направлять через устройство ввода, согласованное с расширяющимся волноводом, сечение которого вонду близко к квадратному. Благодаря небольшой разнице в доплеровских частотах отраженная от критического сечения волна TE_{10}^a инициирует начало взаимодействия электронов с рабочей волной TE_{01}^a , испытывающей существенно большее усиление, чем волна TE_{10}^a . На выходе волна TE_{01}^a не взаимодействует с устройством связи, а волна TE_{10}^a при идеальном согласовании возвращается к задающему генератору. При небольшом усилении она может быть поглощена обычно применяемыми способами. Аналогичное устройство может быть использовано в эллиптическом волноводе с малой величиной эксцентриситета для рабочей моды TE_{11}^a [70].

К концу 1933 г. был выполнен ряд экспериментов, продемонстрировавших возможности и трудности практической реализации широкополосного усиления в указанных схемах gyro-ЛВВ.

В работе [33] описывается об испытанных gyro-ЛВВ диапазоне 35 ГГц, имеющей электродинамическую систему, показанную на рис.3.6. Использовалась рабочая мода TE_{01} , возбуждаемая в выходном волноводе посредством направленного ответвителя, связывающего цилиндрический волновод с прямоугольным. Этот же ответвитель применялся для связи усиленной TE_{01} волны с волной TE_{10} прямоугольного волновода, в котором проводились измерения выходной мощности. Настройка магнитного поля осуществлялась с помощью двух дополнительных соленоидов, позволяющих реализовать требуемое распределение с точностью около 0,5 % в средней области пространства взаимодействия. Напряженность поля, создаваемого ими в сечении с радиусом 0,533 см, всегда поддерживалась равной нулю. В лампе использовалась та же электронная пушка, что и в предыдущих экспериментах. Согласно расчетам, ожидалось усиление в диапазоне частот от 33,3 до 38,7 ГГц. Напряжение и ток пучка составляли соответственно 70 кВ и 1 А. Зависимость коэффициента усиления от частоты, полученная экспериментально, представлена точками на рис.3.7. Стриховая кривая определяет средний уровень усиления, соответствующий 18 дБ. Осциллиции

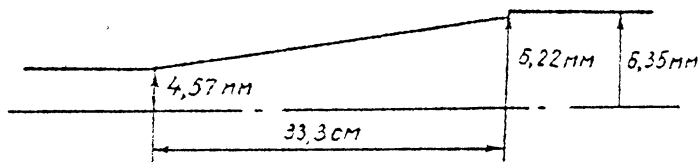


Рис.3.6. Схема пространства взаимодействия gyro-ЛВВ

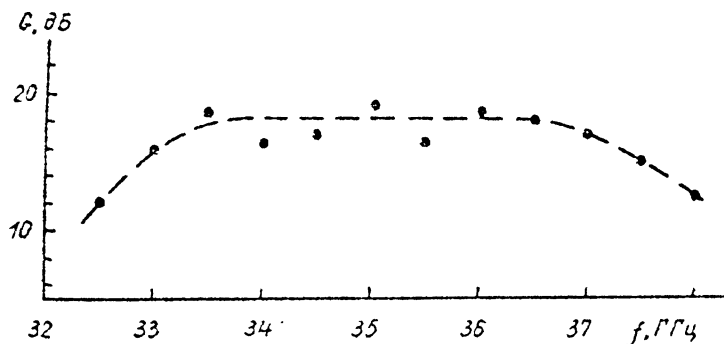


Рис.3.7. Зависимость коэффициента усиления G от частоты входного сигнала f

коэффициента усиления вызваны скорее всего отражением рабочей моды от узла связи $TE_{01}^0 \leftrightarrow TE_{10}^0$ [33]. Полоса усиления по уровню -3 дБ для экспериментальных точек составляет 12,2 %, а для сглаженной кривой - 13,2 %. Отмечалось возникновение нежелательных ВЧ-колебаний при настройке магнитного поля, которые самовозбуждались при токе пучка, несколько превышающем 1 А. Для однородного магнитного поля на частоте 35 ГГц усиление составляло несколько децибел и резко возрастало при оптимальной настройке дополнительных узлов. Усилению в середине диапазона частот значительно превышало усиление в gyro-УВБ с однородным волноводом длиной 21 см, несмотря на то, что здесь длина области синхронизма составляла только 12 см. По-видимому, в предыдущих экспериментах настройке магнитного поля на точное выполнение условий синхронизма касания препятствовало возникновение паразитных ВЧ-колебаний [16,30].

Отмечено отсутствие в конической gyro-УВБ уменьшения коэффициента усиления на 9,5 дБ, характерного для традиционной схемы. Высказано предположение, подтверждаемое оценками в рамках метода Вентцеля, Крамера, Бриллиана, что это свойство возникает при усилении отраженных волн [33].

Успешные испытания gyro-УВБ с коническим волноводом позволили разработать проект усилителя с мгновенной полосой частот 38 % [71]. Испытания экспериментальной лампы состоялись в 1983 г. Электродинамическая система представляла собой волновод прямоугольного сечения, расширяющийся по широкой стенке от 3,7 мм со стороны пушки до 6,01 мм на длине 52,54 см. Расширение продолжалось дальше с тем же углом до стандартного размера волноводов (7,11 мм) диапазона 26,5-40 ГГц. Высота была постоянной - 3,56 мм [72]. Условия синхронизма выполнялись для основной волны TE_{10}^0 , отражающейся от критического сечения. Входной сигнал на встречной волне TE_{10}^0 поступал со стороны коллектора.

Формирование пучка осуществлялось пушкой, работающей в режиме ограничения эмиссии пространственным зарядом. Использовалась экранированная от магнитного поля пушка Пирса. Диаметр пучка в области экрана составлял 0,75 мм, первичная плотность - 10^{-7} А/В^{3/2}. Напряжение не превышало 40 кВ. Начальная энергия вращения электронов возникала в поперечном электростатическом поле, создаваемом двумя электродами, расположенными по разные стороны от пучка вблизи магнитного экрана. Параметр $\alpha = v_{\perp} / v_{\parallel}$ изменялся с изменением потенциалов на электродах. Для $\alpha = 1,5$ коллекторный ток составил 93 % от тока катода. 7 % электронов оседало на поверхность экрана. При увеличении α появлялось оседание электронов на поверхности положительного электрода. Часть тока терялась из-за отражения электро-

нов в области нарастающего магнитного поля, величина которого увеличивалась от 1,2 кГс на поверхности экрана до 15 кГс в начале пространства взаимодействия. Для $\alpha = 2$ коллекторный ток не превышал 50 % от тока катода. Рабочий ток принимался равным току на коллектор вследствие пренебрежимо малого оседания электронов на поверхность электродинамической системы. Разброс осевых скоростей электронов, согласно оценкам, не превышал 15 % в рабочих режимах.

Однородное магнитное поле в пространстве взаимодействия создавалось сверхпроводящим соленоидом. Пространственные вариации магнитного поля осуществлялись с помощью двадцати охлаждаемых водой катушек длиной 2,03 см, имеющих внутренний и внешний диаметры 2,54 и 5,1 см соответственно. Расстояние между центрами катушек составляло 2,79 см. Количество витков равнялось 24.

Эксперимент вскрыл большие технические трудности, стоящие на пути реализации широкополосного усиления в протяженных электродинамических системах типа ТЭВ с распределенным взаимодействием. Одна из главных проблем — настройка распределения магнитного поля. В начале эксперимента, когда все катушки были настроены на выполнение расчетных условий синхронизма касания, частотная зависимость коэффициента усиления представляла собой, по выражению авторов, "частоты из высоких пиков и глубоких провалов" [72]. Погрешности изготовления волновода и катушек были слишком велики. Как показали холодные измерения, зависимость частоты отсечки волновода от продольной координаты отличалась в пределах ± 1 % от закона линейного расширения. Разброс параметров катушек характеризуется такой же величиной. В итоге требуемое распределение магнитного поля подбиралось экспериментально. Сравнительно просто реализуется полоса усиления около 12 %, когда существенны только 6-8 катушек. Дальнейшее попытке ее расширения наталкиваются на все возрастающие трудности согласованной настройки большого числа катушек. Установлено, что любая катушка влетает на усиление в широком, а не локальном, так можно было бы ожидать, диапазоне частот, приводя к появлению всплесков и провалов коэффициента усиления [72]. Постоянно возникающая абсолютная неустойчивость [29] значительно усложняла настройку.

Проверка распределения магнитного поля осуществлялась косвенно и состояла в измерении частотной зависимости коэффициента усиления. Из-за отсутствия подходящего способа широкополосного сэмплирования частоты в режиме работы с высокой скважностью и малой длительностью импульсов эта процедура была чрезвычайно трудоемкой.

В дальнейших экспериментах предлагается увеличить точность изготовления волновода и катушек, свести погрешности к 0,1 %, уменьшить число катушек до 8-10 и разработать методику широкополосного

свипирования частоты. Наилучший результат, достигнутый в итоге настройки распределения магнитного поля, состоит в реализации устойчивого усиления в диапазоне частот от 26,5 до 35 ГГц — 28 %. Частотная зависимость коэффициента усиления (в децибелах) весьма неравномерна, имеет два резонансных пика в области 31,5 и 34,8 ГГц, но не содержит нулей. Средний уровень коэффициента усиления соответствует примерно 10 дБ [72].

Приведено исследование проблемы подавления паразитных ВЧ-колебаний в gyro-ЛВВ с распределенным взаимодействием. В рассматриваемой лампе, работающей на основной моде прямоугольного волновода и хорошо согласованной с нагрузкой, самовозбуждение ВЧ-колебаний наблюдалось при возникновении абсолютной неустойчивости [72]. Для подавления паразитных ВЧ-колебаний в gyro-ЛВВ с однородной электродинамической системой обычно используются два способа — изменение распределенного поглощения ВЧ-энергии и понижение напряженности магнитного поля в пространстве взаимодействия. В последнем способе уменьшение напряженности магнитного поля вплоть до 6 % по отношению к величине, соответствующей условиям синхронизма касания, не приводит к заметному уменьшению усиления. Полоса усиления при этом сужается до 1 % [72]. В gyro-ЛВВ с распределенным взаимодействием эти меры не привели к желаемому результату. При уменьшении напряженности магнитного поля на 1–2 % коэффициент усиления уменьшался весьма существенно, а то время как стартовый ток паразитных ВЧ-колебаний увеличивался незначительно. Потери ВЧ-энергии в электродинамической системе до внесения поглощения зависели от частоты и возрастали от 0,5 дБ при 26,4 ГГц до 2 дБ при 35 ГГц. Поглощение ВЧ-энергии осуществлялось с помощью графитовых стержней, расположенных в углах волновода. В итоге устойчивость усилителя резко возросла, однако коэффициент усиления был меньше, чем для тока 0,1 А до установки поглощающих стержней. Проблемы, возникающие при нагрузке паразитных колебаний в схеме gyro-ЛВВ с распределенным взаимодействием и отраженной волной, заключаются в крайне неравномерном влиянии поглощения ВЧ-энергии на усиление в различных областях рабочего диапазона частот. Например, поглощение ВЧ-энергии, локализованное в середине пространства взаимодействия с целью подавления паразитного колебания, возникающего на соответствующей частоте, не повлияет на усиление в низкочастотном диапазоне и приведет к его уменьшению в области высоких частот. Стартовые условия для паразитных колебаний на высоких и низких частотах останутся неизменными. Распределение поглощения на всей длине пространства взаимодействия также ставит высокочастотную область полосы усиления в невыгодное положение вследствие ослабления как входного, так и усиленного сигнала на всей длине лампы. Эти недостатки сохра-

вляется и для схемы с вводом сигнала через боковую поверхность волновода посредством системы резонансных фильтров [32]. Ее преимуществом, тем не менее, является отсутствие ослабления входного сигнала еще до начала усиления. В схемах с распределенным взаимодействием некоторые перспективы открывает метод резонансных потерь. Однако техническая сторона его осуществления и влияние резонансных потерь на характеристики лампы в настоящее время не исследованы в достаточной степени [72]. В связи с указанными трудностями возможности реализации сверхширокополосной gyro-ЛЭВ с распределенным взаимодействием остаются неясными. И созданию; сопоставление результатов этого эксперимента с результатами предшествующих экспериментов затруднено из-за использования различных систем формирования пучка и различного напряжения, тем более что авторами для улучшения работы рекомендовано повышение потенциала до 60–70 кВ.

В работе [72] представлены также результаты эксперимента, свидетельствующие, по мнению авторов, о возможности расширения полосы усиления в традиционной схеме gyro-ЛЭВ до 20 % с помощью применения подходящего распределения магнитного поля вдоль пространства взаимодействия. Данный способ сравнительно мало исследовался в зарубежной литературе. В ходе экспериментов с gyro-ЛЭВ, о которой говорилось выше, было обнаружено усиление в полосе примерно 10 %. Напряженность магнитного поля при этом на 8–9 % превышала величину, соответствующую выполнению условий синхронизма касания. Усиление наблюдалось при напряжении 30 кВ и токе 0,32 А. Параметр $\alpha = 1,5$, а разброс осевых скоростей электронов составлял 12 %. Холодное затухание постепенно возрастало от 6 дБ на частоте 27 ГГц до 12,5 дБ на частоте 32 ГГц. Расчет усиления в обнаруженном режиме работы хорошо коррелирует с экспериментальными данными и указывает на возможность существенного увеличения как коэффициента, так и полосы усиления при уменьшении разброса скоростей электронов. Механизм широкополосного усиления не комментируется, однако утверждается, что с его помощью разработан проект традиционной схемы gyro-ЛЭВ, имеющей полосу усиления 20 % по уровню –3 дБ. Напряжение пучка 90 кВ, максимальный коэффициент усиления 25 дБ, распределение напряженности магнитного поля вдоль оси неоптимальное. Схема должна быть теоретически устойчивой при $\alpha = 0,7$ и токе пучка 0,7 А. Использование материалов, поглощающих энергию ВЧ-поля для нагрузки паразитных колебаний, позволяет получить устойчивое усиление вплоть до тока 4 А. Осуществление эксперимента с такой gyro-ЛЭВ входит в дальнейшие планы работ. Предполагается также постановка экспериментов с повышенным до 60–70 кВ напряжением для исследования gyro-ЛЭВ с распределенным взаимодействием и вводом входного сигнала посредством резонансных фильтров [72].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя развитие за последние 6-7 лет разработок gyroприборов за рубежом, в особенности в США, нетрудно убедиться, что к настоящему времени четко обозначились области, в которых использование сверхмощных генераторов и усилителей миллиметрового диапазона длин волн позволяет получить существенные преимущества. Это предопределяет хороший темп разработок и дает возможность постоянно расширять фронт исследований.

Гиротроны-генераторы нашли широкое применение в исследованиях по осуществлению управляемой термоядерной реакции, где с их помощью стала возможной постановка уникальных экспериментов. Использование гиротронов в этой области исчерпывающе представлено в статье Г.С.Нусиновича*. Гиротроны-усилители разрабатываются для РЛС, систем связи и РИД [1-4, 32, 73].

В гиротронах-генераторах фирмы "Varian" уже достигнут уровень непрерывной мощности более 200 кВт в диапазоне 60 ГГц и в ближайшее время аналогичные по характеристикам генераторы будут созданы фирмами "Hughes" и "Thomson CSF". Продемонстрированы гиротроны с КПД 65 %, работающие в режиме коротких импульсов. Дальнейшее направление развития этих приборов определяется требованиями исследований в области плазменных экспериментов. Первоочередной задачей является освоение диапазона 100-200 ГГц с последующим увеличением выходной мощности примерно до 1 МВт в непрерывном и квазинепрерывном режимах. Проводимые в настоящее время работы и уже достигнутые результаты в области селекции мод и увеличения КПД - применение резонаторов ступенчатого профиля и неоднородного магнитного поля, совершенствование электронно-оптических систем [48, 50, 66, 74] - наряду с поиском оптимальных схем, например, использующих квазиоптические резонаторы для решения проблемы охлаждения резонатора и коллектора, позволяет считать реальными перспективы создания генераторов с указанными параметрами при условии удовлетворительного решения проблемы окна вывода энергии.

Успешная разработка трактов для транспортировки мегаваттного уровня ВЧ-мощности, содержащих преобразователи мод с КПД, превышающим 90 % [40, 75], сулит существенное увеличение возможностей гиротронов - как генераторов, так и усилителей. Среди последних определенным достижением является gyro-LWB фирмы "Varian" диапа-

* Нусинович Г.С. Гиротроны - источники мощного электромагнитного излучения МВ. - Зарубежная радиоэлектроника, 1984, № II.

зона 94 ГГц, имеющая выходную мощность более 20 кВт и полосу усиления 2 %. Гиро-ЛВВ того же диапазона с выходной мощностью 10 кВт и полосой усиления 4 % разрабатывается фирмой "Hughes". Хотя выходные параметры созданных гиро-ЛВВ превосходят параметры ЛВВ О-типа, они, несомненно, не исчерпывают возможностей гиротронов-усилителей. Сценивая ближайшие перспективы зарубежных гиро-ЛВВ, реалистично складать в первую очередь увеличения выходной мощности и КПД в уже имеющихся разработках при одновременном совершенствовании узлов ввода энергии и умеренном увеличении полосы усиления. Для достижения параметров, полученных фирмой "Varian" в гиро-ЛВВ диапазона 5 ГГц (120 кВт выходной мощности при полосе и коэффициенте усиления 6 % и 24 дБ соответственно), необходима дальнейшая работа по улучшению электронно-оптической системы, подавлению паразитных колебаний и исследованию характеристик гиро-ЛВВ в режиме насыщения выходной мощности [42].

Относительно перспектив создания гиро-ЛВВ с уровнем выходной мощности, приближающейся к достигнутому в генераторах, трудно делать сколько-нибудь определенные прогнозы. В настоящее время имеется тенденция наращивать мощность посредством увеличения потенциала пучка, что облегчает к тому же решение проблемы устойчивости, уменьшает требования к точности реализации распределения магнитного поля и способствует расширению полосы усиления [72]. Учитывая успешный опыт использования высоковольтных (до 80 кВ) узких пучков в генераторах, нельзя исключить их применение для развития сверхмощных гиро-ЛВВ с относительно низкими рабочими модами. Альтернативный путь реализации работы на относительно низких модах ведет к уменьшению напряжения и увеличению тока пучка. Он, однако, сопряжен с решением трудных проблем. В какой-то степени это направление представлено в разработке гиро-ЛВВ фирмы "Hughes", где потенциал пучка составляет 27 кВ, а рабочей модой является пятая по счету мода TE_{01} (в гиро-ЛВВ фирмы "Varian" используется работа на основной моде TE_{11}).

Замечание, но, по-видимому, достаточно отдаленные перспективы создания гиро-ЛВВ с распределенным взаимодействием и мгновенной полосой усиления свыше 20 % также потребуют применения высоковольтных пучков и связаны с использованием низких рабочих мод [72]. В этих схемах пока не была продемонстрирована работа с приемлемой развязкой входной и выходной волн. Разработка керамического окна вывода энергии (до сих пор в экспериментах использовалась тонкая пластина слюды), не приводящего к резонансам в электродинамической системе в рабочем диапазоне частот, является определенной проблемой широкополосного усилителя ограниченной волны.

Зарубежные исследования гиротронов были весьма интенсивны

в конце минувшего десятилетия. В диапазоне 28 ГГц достигнут уровень мощности 65 кВт при коэффициенте усиления 40 дБ и полосе частот 0,2 %. Однако недавний КИД (9 Я) неудачные эксперименты с гиросцистрономом на второй гармонике циклотронной частоты в диапазоне 11-12 ГГц и отсутствие перспектив получения усиления в полосе частот ниже 1 %, вероятно, повлияли на темпы ведущихся работ. В настоящее время вновь появились проекты экспериментов с многорезонаторными гиросцистрономами [26,27], от результатов которых зависит оценка этих усилителей. Возможные преимущества гиросцистрононов над гиросцистрами заключаются в более высоких уровнях выходной мощности, КИД и коэффициента усиления [48]. Однако эти преимущества еще предстоит продемонстрировать. Их существенный недостаток — узкая мгновенная полоса усиления. Предполагаемой областью применения гиросцистрононов считаются будущие поколения линейных ускорителей, где они могут использоваться в качестве мощного источника ВЧ-энергии [48]. Триодные схемы гиросцистродов за рубежом не исследовались.

В целом в развитии гиросцистродов-генераторов и широкополосных гиросцистродов-усилителей за рубежом, особенно в США, был достигнут быстрый и значительный прогресс. Их характеристики существенно совершенствуются для применений в исследованиях по осуществлению управляемой термоядерной реакции, в радиолокации диапазона 35 и 94 ГГц и в системах связи.

1. Johnston S.L. - Microwave J., 1977, vol.20, N 11.
2. Uehrin G.J. - Microwave J., 1980, vol.23, N 6.
3. Herbaugh R.E. - Microwaves, 1979, March.
4. Moncrief P.J. - Microwaves, 1979, March.
5. Microwave System News, 1980, N 5.
6. Plyagin V.A. et al. - IEEE Trans., 1977, vol.MTT-25, N 6.
7. Jory H.R. et al. - Microwave J., 1978, vol.21, N 8.
8. Granatstein V.L., Reed M.E. - Int. J.Electronics, 1982, vol.53, N 6.
9. Rano S. - Proc.IRE, 1959, vol.27, N 12.
10. Hahn K.O. - Gen. Elec. Rev., 1959, vol.42, N 6.
11. Baird M.J. - IEDM, Washington, DC, 1979.
12. Twiss R.Q. - Aust. J. Phys., 1958, vol.11, N 12.
13. Schneider J. - Phys. Rev. Let., 1959, vol.2, N 6.
14. Pantell R.E. - Proc.IRE, 1959, vol.47, N 6.
15. Mourier G. - Arch. für Elektr. und Übertrag., 1980, vol.34, N 12.
16. Hirschfield J.L., Woottel J.M. - Phys.Rev.Let., 1964, vol.12, N 5.
17. Hirschfield J.L., Granatstein V.L. - IEEE Trans., 1977, vol. MTT-25, N 6.
18. Bennett L.R. et al. - IEDM, Washington, DC, 1979.
19. Carmel Y. et al. - Int. J. Infrared and MM Waves, 1982, vol.3, N 5.
20. Carmel Y. et al. - Phys.Rev.Let., 1983, vol.50, N 2.
21. Kim K.J. et al. - Int. J. Electronics, 1981, vol.51, N 4.
22. Derfler H. et al. - IEEE Trans., 1982, vol.ED-29, N 12.
23. Terkin R.J. - Int. J. Infrared and MM Waves, 1981, vol.2, N 4.
24. Jory H.R. et al. - Report at 4 Int. Conf. Infrared and MM Waves, 1979, Dec., Miami Beach, Florida, USA.
25. Granatstein V.L. et al. - Report at 4 Int. Conf. Infrared and MM Waves, 1979, Dec., Miami Beach, Florida, USA.
26. Ganguly A.K., Chu K.R. - Int. J.Electronics, 1981, vol.51, N 4.
27. Arfin B., Ganguly A.K. - Int. J. Electronics, 1982, vol.53, N 6.
28. Symons R.H., Jory H.R. - Advances in Electronics and El. Phys., 1981, vol.55.
29. Lau et al. - Int. J.Infrared and MM Waves, 1981, vol.2, N 3, p.373.

30. Barnett L.R. et al. - IEDM, Washington, DC, 1980.
31. Seftor J.L. et al. - IEEE Trans., 1979, vol.QE-15, N 9.
32. Chu K.R. et al. - IEEE Trans., 1981, vol. ED-28, N 7.
33. Barnett L.R. et al. - IEEE Trans., 1981, vol.ED-28, N 7.
34. Lau Y.Y., Chu K.R. - Int. J. Infrared and MM Waves, 1981, vol.2, N 3, p.415.
35. Wachtel J.M., Wachtel E.J. - Appl. Phys. Let., 1980, vol.37, N 12.
36. Fromm W.E. - Microwave J., 1977, vol.20, N 11.
37. Gilgenbach R.M. et al. - Phys. Rev.Let., 1980, vol.44, N 10.
38. Kreischer K.E., Temkin R.J. - Infrared and LM Waves - Acad. Press, 1983, vol.7.
39. Proc. 3 Int. Symp. on Heating in Toroidal Plasmas, Grenoble, France, March 1982.
40. Proc. 4 Int. Symp. on Heating in Toroidal Plasmas, Rome, Italy, March 1984.
41. Freije S.A. et al. - Int. J. Electronics, 1982, vol.53, N 6.
42. Jory H.R. - IEDM, Washington, DC, 1981.
43. Zavadil D.A. - Microwave J., 1980, vol.23, N 7.
44. Jory H.R. et al. - Report at 3 Int. Symp. on Heating in Toroidal Plasmas. Grenoble, France, March 1982, vol.3.
45. Symons R.S. et al. - IEDM, Washington, DC, 1983.
46. Road M.D. et al. - Report at 4 Int. Conf. on Infrared and MM Waves, Dec. 1979, Miami Beach, Florida, USA.
47. Arfin B. et al. - IEEE Trans., 1982, vol. ED-29, N 12.
48. Granatstein V.L., Park S.Y. - IEDM, Washington, DC, 1983.
49. Caplan M. et al. - IEDM, Washington, DC, 1981.
50. Tancredi J.J. - Report at 7 Int. Conf. on Infrared and MM Waves. Marseille, France, Febr.1983.
51. Boulanger Ph. et al. - Report at 4 Int. Conf. on High-Power Electron and Ion Beams, Palaiseau, France, July 1981.
52. Psillon G., Mourier G. - Report at 3 Int. Symp. on Heating in Toroidal Plasmas. Grenoble, France, March 1982, vol.3.
53. Mourier G. - Report at 8 Int. Conf. on Infrared and MM Waves, Miami Beach, Florida, USA, 1983.
54. Temkin R.J. et al. - Int. J. Infrared and MM Waves, 1982, vol.3, N 4.
55. Kageyama T. et al. - IEDM, Washington, DC, 1983.
56. Brand G.P. et al. - Int. J. Infrared and MM Waves, 1983, vol.3, N 5.
57. Silverstein J.D. et al. - IEEE Trans., 1980, vol.MTT-28, N 9.

53. Symons R.S. - IEEE Trans., 1981, vol.MTT-29, N 3.
59. Ferguson P.E., Symons R.S. - IEDM, Washington, DC, 1981.
60. Edgcombe C.J. - Int. J. Electron., 1980, vol.48, N 5.
61. Chu K.R. et al. - IEEE Trans., 1979, vol. MTT-27, N 2.
62. Wangerson R.C. - Phys. Rev. Let., 1961, vol. 6, N 5.
63. Bott I.B. - Proc. IEEE, March 1964.
64. Manheimer W.M., Granatstein V.L. - NRL Memo Report N 3493, July 1977.
65. Sprangle P., Drobot A.T. - IEEE Trans., 1977, vol.MTT-25, N 6.
66. Seftor J.L. et al. - IEEE Trans., 1979, vol.ED-26, N 10.
67. Choe J.Y., Ahn S. - IEEE Trans., 1980, vol.ED-27, N 1.
68. Marcatili E.A. - U.S. Patent 2, 960, 670, March 1953.
69. Lau Y.Y., Chu K.R., Barnett L.R., Granatstein V.L. - Int. J. Infrared and EM Waves, 1984, vol.2, N 3, p. 393.
70. Lau Y.Y., Barnett L.R., Baird J.M. - IEEE Trans., 1983, vol.ED-30, N 12.
71. Barnett L.R. et al. - IEDM, Washington, DC, 1982.
72. Barnett L.R. et al. - IEDM, Washington, DC, 1983.
73. Wicker L.R., Webb D.C. - Proc.NATO-AGARD Conf. N 245, Munich, PR3, Sept.1978.
74. Fliflet A.W. et al - Int. J.Electronics, 1982, vol.53,N 6.
75. Moeller C.P. - Int. J. Electronics, 1982, vol.53, N 6.
-

ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Серия I. Электроника СВЧ

Александр Павлович Кейер,
Вадим Олегович Ничипоренко

ГИРОПРИБОРЫ — СВЕРХМОЩНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И УСИЛИТЕЛИ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН ЗА РУБЕЖОМ

Редактор *Т. П. Ухова*
Технический редактор *А. М. Гритчина*
Корректор *Т. И. Григорьева*

Т-24033	Подписано к печати 29.12.84	Формат 60×90/16
Печать офсетная	Усл. печ. л. 2,8	Уч.-изд. л. 3,5
Заказ № 12	Цена 53 к.	Тираж 1290
		Индекс 4847

Издательство ЦНИИ «Электроника», Москва, 117415