

Винтизенко И.И., Новиков С.С. Релятивистские магнетронные СВЧ-генераторы

Введение

Интенсивное развитие в течение последних десятилетий исследований в области сильноточной электроники связано с широким диапазоном практических применений сильноточных релятивистских электронных пучков (СРЭП), обладающих импульсной мощностью до 10^{12} Вт при энергии электронов 10^5 - 10^7 эВ, токе до 10^6 А, длительностью 10^{-9} - 10^{-6} с. Подобные параметры СРЭП позволяют на несколько порядков превзойти существующий в традиционной СВЧ-электронике уровень мощности электромагнитного излучения, что открывает принципиально новые возможности использования излучения в различных областях науки и техники. Первый успешный эксперимент, выполненный коллективом сотрудников Института прикладной физики АН СССР и Института общей физики АН СССР под руководством академика Гапонова А.В., где были получены импульсы мощностью более 300 МВт на частоте 10 ГГц при к.п.д. 15%, показал возможности релятивистской высокочастотной электроники (РВЭ). На сильноточных электронных ускорителях (СЭУ) исследованы многие релятивистские аналоги сверхвысокочастотных электронных приборов и релятивистских генераторов нового типа. К настоящему времени в релятивистских СВЧ-приборах получены значения импульсной мощности до 10^{10} Вт. Релятивистская высокочастотная электроника стала одним из быстроразвивающихся направлений научных исследований.

В НИИ ЯФ при ТПУ благодаря созданию в 1974 году ускорителя прямого действия «Тонус-1» с параметрами 1 МВ, 40 кА и длительностью импульса 80 нс, появилась возможность для экспериментального исследования взаимодействия сильноточных релятивистских электронных пучков с электромагнитными полями СВЧ-систем. Эти исследования были начаты по инициативе член-корр. РАН Диденко А.Н. и в течение многих лет проводились под его руководством. Экспериментальная база этих исследований непрерывно расширялась: были созданы новые ускорители нано- и микросекундной длительности с импульсным током до 100 кА и линейные индукционные ускорители (ЛИУ), позволяющие работать в периодическом режиме с частотой следования импульсов в сотни герц. Это создало благоприятную возможность для проведения исследований широкого круга приборов СВЧ, как известных в классической электронике (ЛБВ, ЛОВ, клистрон, магнетрон), так и основанных на новых принципах (ЛСЭ, виркаторы, магнетроны с виртуальным катодом).

В процессе исследований обнаружилось значительные трудности в реализации энергетических возможностей СЭУ. Импульсная энергия электронного пучка может достигать мегаджоуля, в то же время энергия в СВЧ-импульсе составляет лишь сотни джоулей. Малая эффективность преобразования энергии вызвана движением электродных плазм, СВЧ-пробоями, возбуждением «паразитных» видов колебаний и т.д. Затруднено и практическое применение генерируемого СВЧ-излучения, что связано с большими весогабаритными показателями установок и, как правило, с моноимпульсным режимом их работы, низким качеством выходного излучения. Наконец, любой релятивистский СВЧ-генератор имеет набор присущих ему специфических свойств, обуславливающих требования к качеству электронного пучка, к магнитной системе, к параметрам ускорителя (внутреннее сопротивление, диапазон напряжений) и т.д. Все это накладывает ограничения на возможность использования любого из

релятивистских генераторов для всего круга применений, что в свою очередь обуславливает многообразие исследуемых приборов.

Хорошо известные достоинства приборов со скрещенными полями предопределили к ним интерес со стороны РВЭ. Частотная и фазовая стабильность генерируемого излучения, высокий к.п.д., небольшие весогабаритные показатели и стоимость, низкий уровень побочных колебаний и гармоник стали основой для проведения интенсивных исследований релятивистских магнетронов. Первым опытом исследований релятивистского магнетрона стал прибор, разработанный Фоменко Г.П., Сулакшиным А.С. в 1976 году в НИИ ЯФ при ТПУ. Анодный блок кардинально отличался от классического магнетрона, имел 20 резонаторов прямоугольной формы разной глубины (реализована разнорезонаторная конфигурация). Такая форма резонаторов была выбрана из-за удобства изготовления. Для увеличения объема пространства взаимодействия внутренний диаметр анодного блока составлял 20 см. Сравнительно невысокий уровень мощности (~100 МВт) и к.п.д. менее 1%, зафиксированные в эксперименте при напряжении 1 МВ, послужили стимулом для поисков оптимальной конструкции и создания прибора с учетом известных рекомендаций для приборов со скрещенными полями.

Первые эксперименты с релятивистскими магнетронными генераторами (РМГ), увенчавшиеся заметными результатами, в США - Массачусетский Технологический Институт и СССР - ИПФ АН СССР (г. Горький), НИИ ЯФ при ТПУ (г. Томск) позволили получить уровни мощности от сотен мегаватт до нескольких гигаватт при к.п.д. 10-30%.

Данная монография посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям релятивистских магнетронных СВЧ-генераторов. Начиная с середины 70-х годов и по настоящее время эти приборы исследуются в различных научных центрах и находят ряд практических применений в экспериментах по рассеянию электромагнитной волны на сильнооточном электронном пучке, в испытаниях радиоэлектронной аппаратуры, для предварительного возбуждения и фазовой синхронизации виркаторов, накачки газовых лазеров, радиолокации, в том числе и нелинейной, для тепловой обработки и модификации полупроводниковых материалов и поверхности металлов.