

Г. И. Чурюмов

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ МАГНЕТРОННЫХ ПРИБОРОВ С АЗИМУТАЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ

1. Введение

Магнетронные приборы с азимутальной симметрией представляют собой наиболее часто применяемую на практике часть ЭВП СВЧ М-типа, в которых замкнутый электронный поток, движущийся в скрещенных статических электрическом и магнитном полях, взаимодействует с электромагнитным полем замедляющей системы (ЗС) (взаимодействие М-типа). Практический интерес разработчиков радиоэлектронной аппаратуры к данным приборам обусловлен их высокими эксплуатационными параметрами, к числу которых относятся высокий КПД, достигающий 50—60, а в отдельных случаях 70 и более процентов, относительно простая конструкция и эксплуатация, малые рабочие напряжения, небольшие размеры и вес на единицу мощности, высокая фазовая стабильность и линейность фазочастотной характеристики в течении импульса (что особенно важно для работы в доплеровских РЛС и РЛС с активными фазированными антенными решетками). Применение холодных вторичноэмиссионных катодов, выполненных, например, из платины с водяным охлаждением, позволяет реализовать такие перспективные режимы работы, как режим безмодуляторного питания (или самомодуляции), а также значительно повысить надежность и долговечность магнетронных приборов (срок службы превышает 5000 ч). Широкий перечень достоинств приборов М-типа обуславливает их применение в различных радиоэлектронных системах (РЭС) при решении задач радиолокации, радионавигации, связи, радиопротиводействия и радиоэлектронного подавления, промышленного и бытового СВЧ-нагрева [1—4].

Рассматривая и обобщая задачи, связанные с проектированием перспективных РЭС, в настоящее время можно выделить как актуальные следующие направления развития магнетронных приборов:

- проектирование и разработка приборов (усилителей и генераторов) М-типа для работы в диапазоне частот до 100 и более ГГц;

- повышение коэффициентов усиления (в перспективе до 25—30 дБ) и КПД (до 70 и более процентов) в приборах дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн;

снижение уровня шумов (основного, внутриимпульсного, межимпульсного, случайного и интермодуляционного);

совершенствование режимов работы (импульсного и непрерывного), а также методов модуляции (в том числе и входным СВЧ-сигналом (режим самомодуляции или безмодуляторного питания);

улучшение частотной стабильности, а также совершенствование методов перестройки частоты (как электромеханических, так и электронных), обеспечивающих рост скорости и диапазона перестройки;

уменьшение уровня побочных колебаний (ПК) и внеграфиковых излучений, а также исследование возможностей управления уровнем ПК.

Значительный прогресс в создании новых ламп связывается с решением вопросов их сверхминиатюризации [5]. Это требует применения качественно иных технологий (например, технологий, основанных на достижениях вакуумной микроэлектроники [6]), а также создания новых видов материалов для производства катодов, магнитно-фокусирующих систем (МФС), внутривакуумных развязок и т. п. Важным моментом, который способствует процессу разработки новых конструкций приборов и совершенствованию режимов их работы, является применение ЭВМ в практике моделирования физических процессов, а также в расчетах выходных характеристик (макропараметров) и их оптимизации на этапе проектирования [7].

В настоящей статье рассматривается современное состояние теории и практики приборов магнетронного типа с азимутальной симметрией, а также проводится анализ перспективных путей их развития. Необходимо отметить, что из-за ограниченного объема статьи проведенные исследования касаются, в основном, направления, связанного с созданием нетрадиционных конструкций приборов, и отражают, в целом, частный взгляд автора на общую ситуацию проблематики приборов со скрещенными полями.

2. Теория

Практическое решение проблемы разработки приборов с улучшенными выходными параметрами находится в прямой зависимости от состояния развития их теории. Исторически вопросы теории ЭВП СВЧ М-типа развивались эволюционно по мере совершенствования конструкций ламп и режимов их работы. Усложнение функций современных РЭС, а также возрастающая конкуренция со стороны ЭВП СВЧ-типа (клистронов, в том числе многолучевых и ЛБВ на связанных резонаторах) предъявляют все более жесткие требования к предельным макропараметрам приборов М-типа как на частоте основного (рабочего) сигнала, так и на частотах ПК и внеграфиковых

излучений. Естественно, что проектирование приборов с предельно высокими эксплуатационными параметрами (режим больших амплитуд) возможно только с помощью методов нелинейного анализа. Однако отсутствие самосогласованной нелинейной аналитической теории приборов М-типа (несмотря на отдельные попытки ее создания [8]) усложняет теоретический анализ. Поэтому для его осуществления применяются численные методы либо несамоогласованный аналитический подход. В последнем случае упор делается на приближенные аналитические модели, при разработке которых вводятся априорные допущения о состоянии электронного облака (модели жесткой, инерционной и безынерционной спиц пространственного заряда (ПЗ) [9]) или известные энергетические представления о характере энергообмена [7]. Недостатком несамоогласованных аналитических моделей является изначальная необходимость использования ряда физических параметров, значения которых должны определяться из проводимых расчетов (например, выбор величины объемной плотности ПЗ и закона ее пространственного распределения в установившемся режиме, динамики изменения угла рассогласования между ВЧ волной и электронным потоком, анодного тока и др.). Поэтому требуется последующее уточнение полученных результатов с помощью более сложных (самосогласованных) численных моделей, практическая реализация которых рассматривается как вычислительный эксперимент.

Применительно к задачам физической электроники СВЧ существует два принципиально отличных друг от друга подхода постановки вычислительного эксперимента. В основе первого подхода лежит совместное решение неоднородной системы дифференциальных уравнений Максвелла для электромагнитного поля и уравнения движения потока заряженных частиц при соответствующих граничных и начальных условиях [10, 11]. Для решения данной самосогласованной системы уравнений используется метод конечных разностей [12] (для электромагнитного поля) в сочетании с методом крупных частиц (или макрочастиц) [13]. При этом динамика движения макрочастиц удовлетворяет законам классической механики при описании поведения многих тел (детерминированный подход в отличие от статистического, который чаще применяется при исследовании процессов в неограниченной плазме) [14]. Количество крупных частиц в расчетах выбирается из условия, что оно адекватно отражает суть физических процессов, протекающих в электронном облаке, обеспечивая минимальный уровень погрешности вычислений ("вычислительных шумов") [15]. Анализ показывает, что метод конечных разностей при решении задач взаимодействия многих тел требует применения мощных супер-ЭВМ, обладающих высоким быстродействием и большой оперативной памятью.

Второй подход более прост и основывается на совместном решении интегродифференциальной системы уравнений, состоящей из трех независимых уравнений: уравнения возбуждения для вихревой компоненты поля, уравнения Пуассона для потенциальной его составляющей (поле ПЗ) и уравнения движения для потока заряженных частиц [16, 17]. Ее решение проводится численно на ЭВМ для замкнутого пространства взаимодействия (многопериодная модель [18]) либо для его отдельной части — сектора с центральным углом, равным $2\pi/\gamma$, где γ — постоянная распространения ВЧ волны, значение которой равно числу замедленных длин волн (квазипериодическое приближение) [19]. Такой подход позволяет реализовать двумерные и трехмерные математические модели приборов, применяя их как при исследовании физических процессов и явлений, так и при решении задач автоматизированного проектирования.

Начало применения методики вычислительного эксперимента к исследованию приборов М-типа относится к концу 50-х гг. и связано с работами Файнштейна и Кайно, Седина, Халла и Куерса, Ганди и Роу, а также М. Б. Цейтлина, Г. Г. Моносова и др. При этом использовались двумерные самосогласованные математические модели приборов с инжектируемым электронным потоком (лампа бегущей волны М-типа (ЛБВМ)) и с распределенной эмиссией в квазипериодическом приближении. Особенно широкое распространение данный подход получил после опубликования работы Кули и Таки, предложивших алгоритм быстрого преобразования Фурье [20], а Хокки использовал его для решения уравнения Пуассона при определении сил ПЗ [21]. В результате удалось более чем на порядок сократить время моделирования и тем самым увеличить количество макрочастиц на ВЧ периоде, доведя их в расчетах с 100—200 до 1000—3000 [19]. Исследования были продолжены в работах А. С. Рошаля, А. Г. Шеина, Д. М. Трубецкова, В. Б. Байбурина, А. А. Шадрина и др. Необходимо отметить, что применение квазипериодического приближения упрощает процесс моделирования, но в то же время ограничивает его возможности при исследовании, например многовидовых и многочастотных режимов работы. Для решения подобных задач используются многопериодные математические модели. Несмотря на трудоемкость их реализации (количество макрочастиц в расчетах увеличивается пропорционально количеству замедленных длин волн, то есть электрической длине лампы), в некоторых случаях они являются единственным путем теоретического исследования процессов многочастотного взаимодействия (например, при анализе возбуждения карматронного вида и высших временных гармоник основного сигнала в лампах обратной волны (ЛОВМ) и амплитронах [9]). Разработкой двумерных многопериодных моделей

приборов М-типа завершился второй этап развития методики вычислительного эксперимента.

Вторая половина 80-х гг. явилась началом третьего этапа развития численных методов. Особенность этого этапа — развитие метода конечных разностей применительно к задачам моделирования физических процессов в электронных приборах СВЧ [22]. В настоящий момент разработаны двумерные математические модели приборов и проводятся исследования по созданию трехмерных моделей. Интерес к таким исследованиям огромен даже несмотря на их трудоемкость и необходимость применения супер-ЭВМ. Объясняется это возможностями, которые открывает такой подход перед исследователями, максимально полно отражая суть изучаемых физических процессов и явлений. В последнее время наметилась тенденция, связанная с бурным развитием специализированного программного и аппаратного обеспечения с целью создания условий для максимального приближения вычислительного эксперимента к натурному (физическому) эксперименту. Для этого применяются специальные программные интерфейсы, позволяющие осуществить “прямую и обратную” связь между непрограммирующим пользователем (разработчиком) и ЭВМ, что дает возможность оперативно вмешиваться в ход эксперимента на любой стадии его проведения. В результате открывается новый (четвертый) этап развития вычислительного эксперимента, связанный с возможностью его интеллектуализации.

В целом, оценивая положительный опыт применения вычислительного эксперимента в практике физического исследования и проектирования магнетронных приборов, необходимо отметить, что такой опыт позволяет не только значительно расширить круг изучаемых физических явлений, но и яснее представить особенности их изменения во времени. Достаточно убедительно это показано на примере исследования таких физических процессов, как фазовая группировка электронного потока, особенности вторичноэмиссионного размножения частиц, ограничения эмиссии ПЗ, неустойчивость электронного облака в статическом режиме работы и др. Более ясной предстает природа явлений насыщения и срыва усиления на рабочем виде колебаний в магнетронных усилителях, а также процесса возбуждения колебаний в магнетронах и т. п. Сравнение вышеперечисленных подходов постановки вычислительного эксперимента показывает, что оптимальным (с точки зрения масштабов и частоты применения) является использование квазипериодического приближения (в дву- и трехмерном случаях) как при решении задач автоматизированного проектирования, так и на этапе исследования механизма электронно-волнового взаимодействия во вновь создаваемых приборах с целью проверки их работоспособности и определения предельных макропараметров. Применение более сложных моделей (двумерных

многопериодных и моделей, в основе которых лежит метод конечных разностей) целесообразно только в отдельных единичных расчетах, когда требуется провести анализ (или уточнение) физических процессов и явлений (в том числе и аномальных), недоступных для исследования с помощью более простых моделей.

Перспективы теоретических исследований в области электроники приборов М-типа связываются с дальнейшим развитием как аналитических, так и численных методов анализа нелинейных процессов (вычислительный эксперимент). В первом случае интерес вызывает поиск новых методов аналитического решения нелинейных уравнений (например, солитонный подход к исследованию динамики приборов М-типа [23]). При этом особое внимание обращается на анализ ПК и внетрактовых излучений (в том числе и на методики исследования шумовых (хаотических) колебаний [24]) в широком спектре частот и различных режимах работы. Кроме того, представляют практический интерес исследования, связанные с совершенствованием методологии вычислительного эксперимента и направленные на его упрощение за счет применения более "быстрых" алгоритмов [25]. Разработанное специализированное программное обеспечение предполагается использовать для целей автоматизированного проектирования как самих приборов, так и отдельных элементов их конструкций и режимов (например, ЗС в основной и высших полосах пропускания, МФС, тепловых потерь и т. п.).

Необходимо отметить, что рассмотренные вопросы теории касались только конструкций классических приборов со скрещенными полями, основу электронного механизма в которых составляет взаимодействие электронного потока с моно- или полигармонической ВЧ волной (электронно-волновая система "электронный поток + ВЧ волна"). В то же время поиск принципиально новых подходов и методов повышения эффективности взаимодействия в приборах М-типа привел к разработке нетрадиционных конструкций данных приборов, основу работы которых составляют системы типа "два электронных потока + ВЧ волна" и "электронный поток + две ВЧ волны" [26, 27]. Теоретические исследования механизма взаимодействия в данных приборах (как в линейном приближении, так и в режиме большого сигнала) практически не проводились, что делает актуальной задачу детального и обстоятельного изучения их работы.

3. Практика

За последние 25—30 лет конструкции классических приборов М-типа с азимутальной симметрией практически не претерпели изменения. В определенной степени это связано со значительными техническими и

технологическими трудностями, сопровождающими процесс разработки новых конструкций ламп. Отчасти причина этого заключается в недостаточном финансировании поисковых НИОКР, а также в недостатках организации процесса исследований и расстановки научных кадров, включая творческую кооперацию промышленных лабораторий и аналогичных структур академических институтов и высшей школы.

Разработкой приборов М-типа занимаются многие ведущие фирмы — признанные мировые лидеры в области производства элементной базы для РЭС. Среди наиболее крупных компаний можно выделить “Raytheon”, “Litton”, “Varian” и “Hughes” (США), “Thomson-CSF” (Франция), EEV (Великобритания), НПО “Исток” (Россия) и др. Значительный прогресс в совершенствовании конструкций магнетронных генераторов для бытовых СВЧ-печей достигнут японскими фирмами и связан с вопросами снижения уровней ПК и внеэлектронных излучений [28]. Учитывая тенденции развития ЭВП СВЧ, остановимся на “узловых точках” проблемы совершенствования конструкций магнетронных приборов с азимутальной симметрией.

На рис. 1 представлена обобщенная классификационная схема магнетронных приборов с азимутальной симметрией. Схемы пространства взаимодействия данных приборов для наглядности приведены на рис. 2. Как видно, кроме классических конструкций, состояние развития которых подробно освещено в литературе [1, 3], предлагается принципиально новое направление совершенствования приборов М-типа, связанное с созданием нетрадиционных конструкций. Разработка такого направления обусловлена необходимостью решения ряда проблем, затронутых в настоящей статье. В частности, это касается вопросов увеличения коэффициента усиления, осуществление устойчивой работы приборов с замкнутым электронным потоком в режиме безмодуляторного питания (самомодуляции), снижения уровня шума, использования режима внешней синхронизации и т. д. С этой целью приведем несколько практических примеров конструктивного построения нетрадиционных приборов. Так, например, в течение последних нескольких лет фирма “Raytheon” (США) ведет разработку усилителя М-типа с повышенным коэффициентом усиления [29]. В результате создан прибор QKS 5028 с катодным способом возбуждения, схема пространства взаимодействия которого представлена на рис. 2, в (случай слабой связи на схеме, представленной на рис. 1, когда ВЧ развязка между волнами катодной и анодной ЗС превышает 20 дБ). Данный прибор, обеспечивая на частоте 3200 МГц усиление 23 дБ при выходной импульсной мощности 1.25 МВт, нашел применение в комплексе AEGIS — одной из наиболее перспективных РЭС [30].

Несколько иной подход к решению проблемы увеличения коэффициента усиления предложен в [26]. Для этого используется комбинированный

усилитель, схема пространства взаимодействия которого представлена на рис. 2, б. В НПО "Исток" (Россия) создан экспериментальный макет такой лампы, которая в S -диапазоне обеспечивает коэффициент усиления, превышающий 20 дБ. Это на 6—8 дБ выше, чем у ламп классической конструкции (амплитронов), работающих в таком же электрическом режиме.

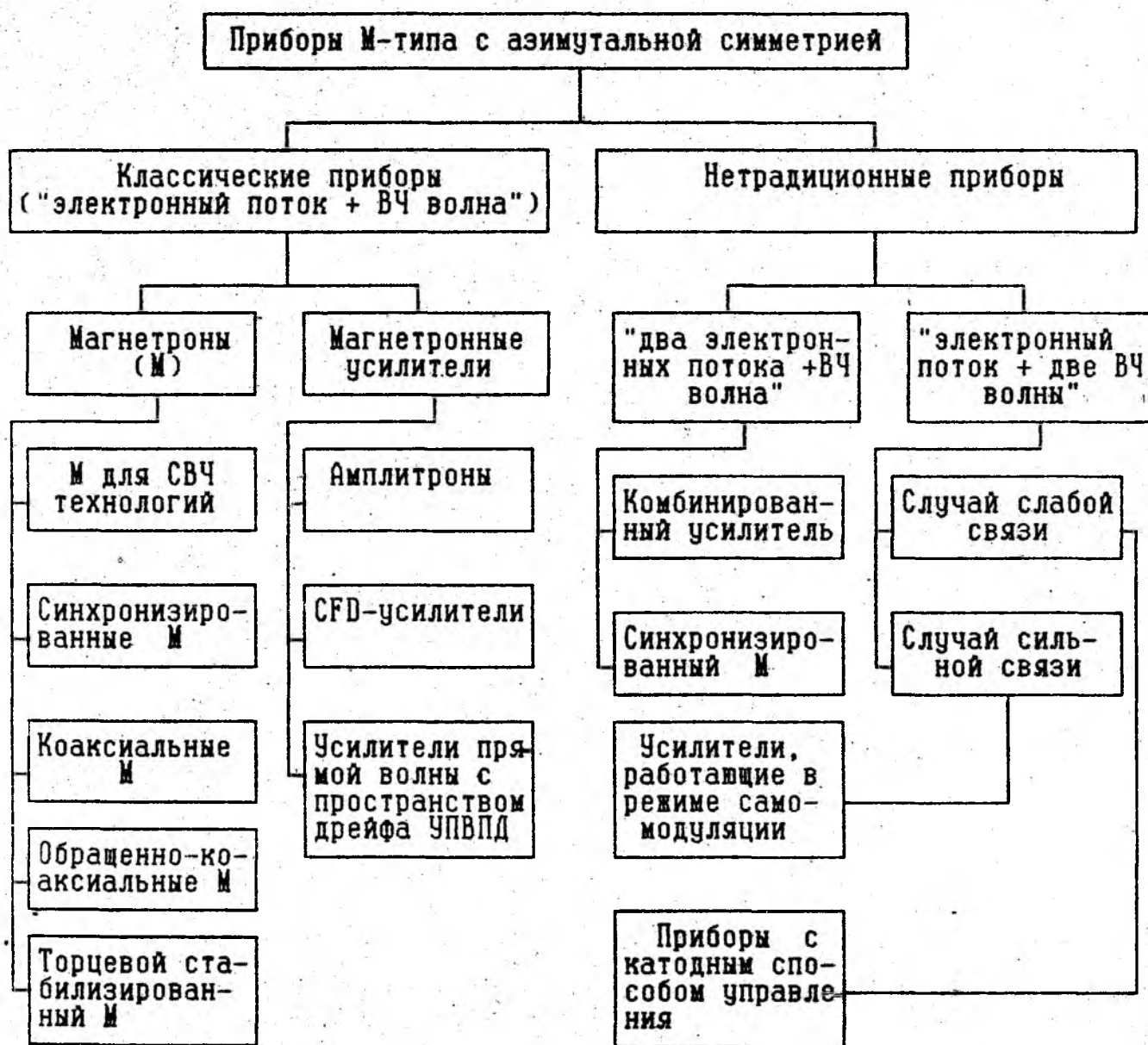


Рис. 1. Классификационная схема приборов М-типа с азимутальной симметрией

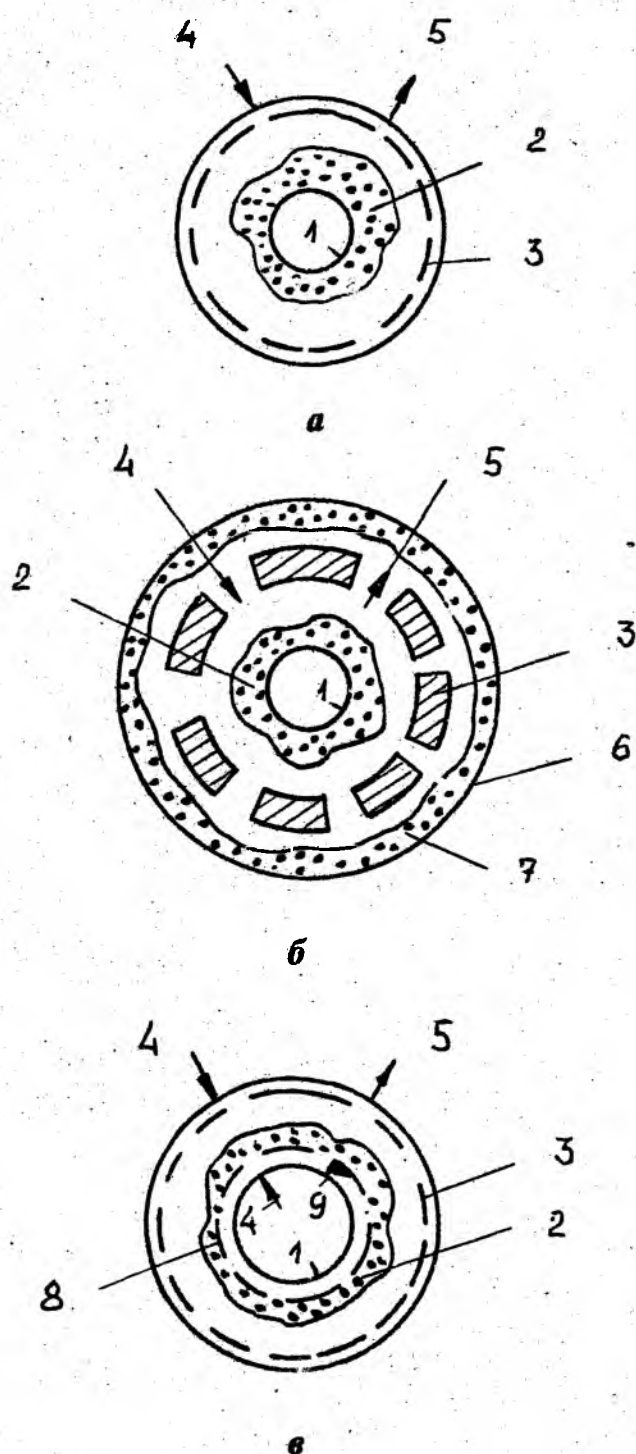


Рис. 2. Схемы пространства взаимодействия классических (*a*) и не-градиционных (*б, в*) приборов М-типа: 1 — катод; 2 — электронный поток; 3 — анодная ЗС; 4 — вход; 5 — выход; 6 — второй катод; 7 — второй электронный поток; 8 — катодная ЗС; 9 — согласованная катодная нагрузка

Практическая реализация схемы, представленной на рис. 2, в, для случая сильной связи между волнами (см. рис. 1), распространяющимися в катодной и анодной ЗС (развязка не превышает 7 дБ) [27], позволила разработать усилитель, устойчиво работающий в режиме безмодуляторного питания (самомодуляции) и обеспечивающий в S -диапазоне при постоянном анодном напряжении 8,5 кВ коэффициент усиления 10—12 дБ, КПД более 40 % и анодный ток (в импульсе) 1 А в рабочей полосе частот, превышающей 6 %. Для сравнения необходимо отметить, что разработанный ранее фирмой "Litton" (США) усилитель прямой волны (дематрон) в режиме управления входным СВЧ-сигналом в том же частотном диапазоне имел коэффициент усиления 12 дБ при КПД не более 30 %.

4. Заключение

Таким образом, анализ состояния теории и практики магнетронных приборов с азимутальной симметрией показывает, что интерес к приборам М-типа не ослабевает и обусловлен, с одной стороны, усложнением функциональных возможностей современных РЭС, а с другой — все возрастающей конкуренцией со стороны приборов 0-типа (клистронов и ЛБВ на связанных резонаторах).

В области теории основное внимание обращается на развитие нелинейных методов анализа (аналитических и численных) и их применение к исследованию предельных выходных параметров и режимов работы приборов. Здесь огромными возможностями обладает вычислительный эксперимент как метод теоретического исследования.

Улучшение выходных параметров и совершенствование режимов работы приборов возможно за счет усложнения их конструкций (нетрадиционные приборы). Полученные экспериментальные результаты обнадеживают, убедительно показывая, что нетрадиционный подход к развитию приборов М-типа является перспективным на пути укрепления их позиций в тех областях, где применение данных приборов оказывается более предпочтительным по сравнению с другими источниками электромагнитного излучения.

Л и т е р а т у р а: 1. *Wadnwa R. P.* Crossed — field microwave devices // *Journal institute electronics & telecommunications ingenering.* — 1978. — V. 24. — № 10—11. — P. 413—437. 2. *Кузьмина В. Г., Савин В. Б.* О перспективах разработки и производства электровакуумных приборов СВЧ в США // *Зарубежная радиоэлектроника.* — 1978. — № 10. — С. 98—107. 3. *Шлифер Э. Д.* Электровакуумные приборы СВЧ М-типа. Коаксиальные и обращенно-коаксиальные магнетроны. "Электроника" (Итоги науки и техники

- ВИНИТИ). — М., 1985. — Т. 17. — С. 169—209. 4. *Савин В. Б., Кузьмина В. Г.* Развитие и применение вакуумных приборов СВЧ в зарубежных странах // Зарубежная радиоэлектроника. — 1990. — № 6. — С. 98—107. 5. *Gulyaev Y. V., Sinitsyn N. J.* Super-minituarization of low-power vacuum microwave devices // IEEE Trans. on Electron Devices. — 1989. — V. 36. — № 11. — P. 2742—2743. 6. *Herman M. A.* Vacuum microelectronics — present status and development trends // International Conference of Microelectronics. — 1992. — V. 1783. — P. 16—30. 7. *Кураев А. А., Байбурун В. Б., Ильин Е. М.* Математические модели и методы оптимального проектирования СВЧ-приборов. — Минск: Наука и техника, 1990. — 256 с. 8. *Tomac G. E.* A nonlinear theory for a microwave crossed-field amplifier. — Int. Electron. Dev. Meet. — Washington, 1980. — P. 176—179. 9. *Цейтлин М. Б., Фурсаев М. А., Бецкий О. В.* Сверхвысокочастотные усилители со скрещенными полями. — М.: Сов. радио. — 1978. — С. 278. 10. *Buneman O.* The advance from 20 electrostatic to 30 electromagnetic particle simulation // Computer physics communications. — 1976. — N 12. — P. 21-31. 11. *Dawson J. M.* Particle simulation of plasmas // Reviews of modern physics. — 1983. — V. 55. — N 2. — P. 403—446. 12. *Рухтенмайер Р., Мортон К.* Разностные методы решения краевых задач. — М.: Мир, 1972. — 321 с. 13. *Харлоу Ф. Х.* Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики // Вычислит. методы в гидродинамике. — М.: Изд-во иностр. лит., 1967. — С. 316—342. 14. *Власов А. А.* Теория многих частиц. — М.: Гостехиздат, 1950. — 324 с. 15. *Поттер.* Вычислительные методы в физике. — М.: Мир, 1976. 16. *Лопухин В. М.* Возбуждение электромагнитных колебаний и волн электронными потоками. — М.: Изд-во техн.-теорет. лит. 1953. — С. 324. 17. *Вайнштейн А. А.* Электромагнитные волны. — М.: Сов. радио, 1957. — 580 с. 18. *MacGregor D. M.* Computer modeling of crossed-field tubes // Appl. of Surface Sciences. — 1981. — N 8. — P. 213—224. 19. *Yu S. P., Kooyers G. P., Buneman O.* Time-depend computer analysis of electron-wave intereaction in crossedfields // J. of Appl. Physics. — 1965. — V. 36. — N 8. — P. 2550—2559. 20. *Cooly J. W., Takey J. W.* An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // Math. Comput. — 1965. — N 19. — P. 75—81. 21. *Hockney R. W.* A fast direct solusion of Poissen's equation using Fourier analysis // J. of the ACM. — 1965. — V. 12. — N 1. — P. 95—113. 22. *Drobot A.* Simulation thechniques for selfconsistent treatment electron dynamic in high microwave tubes. — Int. Electron Dev. Meet. — Washington, 1981. — P. 662—665. 23. *Tomac G. E.* Solitons and microwave crossed-field amplifier charateristics. — Int. Electron. Dev. Meet. — Washington, 1981. — P. 7—11. 24. *Riypoulus S. A.* Feedback-induced noise in crossing field devices // IEEE Trans. Plasma Sci. — 1992. — V. 20. — N 3. — P. 360—369.

25. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. — М.: Мир, 1987. — 637 с. 26. Сергеев Г. И., Чурюмов Г. И. Комбинированный усилитель М-типа. Патент РФ, № 1780452, приоритет 06.08.90. 27. Сергеев Г. И., Чурюмов Г. И. Способ гашения генерации паразитных колебаний в паузах между СВЧ-импульсами и устройство для его осуществления. Положительное решение по заявке № 5059782/10(025817), подана 08.05.92. 28. Harada A., Kitakaze S., Oguro T. Reduction of 5th harmonic electromagnetic interference from magnetrons and microwave ovens // J. of microwave power and electromagnetic energy. — 1987. — V. 22. — N 1. — P. 3—13. 29. Macmaster G. H. Current status of crossed-field devices // Int. Electron Devices Meet., San Francisco, Calif., 1988. — Dec. 11—14. P. 38—361. 30. Андрианова Е. П. и др. Параметры лучших зарубежных СВЧ-приборов. — М.: ОНТИ НПО “Исток”, 1990. — 126 с.

УДК 621.382.029.

В. И. Осинский, К. С. Сундучков

СВЧ-УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ АЗВ5

В работе рассматриваются твердотельная элементная база и ряд новых СВЧ-приборов: МШУ конвертеров; монолитных коммутаторов и делителей частоты; станций приема спутниковых телевизионных сигналов и передатчиков телевидения станций спутниковой связи и др. Показано, что на основе современных технологий материалов группы АЗВ5 возможно создание отечественной СВЧ элементной базы и аппаратуры на ней, которые решают проблему импортозамещения. Анализ приведен на основе работ, выполненных в АО НПП “Сатурн” (г. Киев).

1. Введение

Комплекс физико-технологических и схмотехнических методов обработки СВЧ-сигналов и создание устройств и систем принято называть СВЧ-технологиями (microwave technology) [1], которые являются базовыми технологиями высокоразвитых стран и обеспечивают им уверенное превосходство в ведущих областях производства и культуры. Акционерное общество “Научно-производственное предприятие “Сатурн” обладает современным комплексом СВЧ-технологий. Предприятие создано в 1968 г.