

АО «НПП «Торий». Электроника больших мощностей

Д. Калашников¹

УДК 621.385.6 | ВАК 05.27.01

В качестве источников СВЧ-энергии в ускорительных установках различного назначения широко используются мощные импульсные клистроны или магнетроны. От характеристик этих приборов зависят ключевые параметры ускорительной техники. В АО «НПП «Торий» разработали линейку высокоэффективных многолучевых клистронов и клистронов непрерывного действия, которые по своим характеристикам способны конкурировать с зарубежными аналогами. Применение этих приборов позволяет снизить массогабаритные характеристики ускорительных установок, повысить их надежность и эффективность. В статье обсуждаются перспективные направления развития мощных электровакуумных СВЧ-приборов, особенности и основные области применения клистронов импульсного и непрерывного действия, созданных в АО «НПП «Торий».

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительная техника, которая стала бурно развиваться с середины 1960-х годов, первоначально использовалась преимущественно для исследований в области атомной и ядерной физики, но впоследствии нашла широкое применение и в других отраслях.

Свойство частиц проникать через материалы значительной толщины используется в интроскопии. Линейные ускорители электронов являются основной частью инспекционно-досмотровых комплексов (ИДК), осуществляющих интроскопию крупногабаритных объектов таможенного контроля, отличающихся значительными размерами, весом, составом конструкционных материалов, повышенной плотностью загрузки различными видами перевозимых в них товаров. ИДК позволяют визуализировать содержимое объектов и распознавать находящиеся в них различные устройства, предметы и вещества.

Линейные ускорители позволяют осуществлять неразрушающий контроль качества материалов, заготовок, изделий с целью обнаружения дефектов их строения (дефектоскопия). Наличие в изделии нарушений сплошности, инородных включений, изменений плотности и толщины приводит к различному ослаблению излучения в различных его сечениях, что позволяет точно определить местоположение дефекта.

Способность малых доз радиации уничтожать бактерии и насекомых широко используется в дезинсекции и дезинфекции пищевых продуктов, стерилизации медицинских изделий одноразового пользования (шприцы,

хирургические принадлежности и т.д.), одежды, фармацевтических препаратов, радиационной очистке природных и сточных вод.

С помощью ионизирующего излучения модифицируют материалы – улучшают характеристики полупроводников, повышают термостойкость и механическую прочность кабелей и проводов, осуществляют вулканизацию компонентов шин, радиационную полимеризацию.

Ускорители нашли широкое применение в лучевой терапии. С помощью сфокусированного излучения удается создать высокую дозу радиации в области опухоли для полного подавления ее роста без одновременного облучения окружающих тканей. На сегодняшний день лучевая терапия является единственным методом терапии удаленных метастаз раковых опухолей.

Кроме того, в крупных ускорительных центрах продолжают научные исследования свойств радиационного излучения и находят новые способы его применения.

Параметры ускорителей напрямую зависят от характеристик источников СВЧ-энергии – мощных импульсных клистронов или магнетронов. Большинство ускорительных центров России (в том числе медицинских) и досмотровых комплексов используют продукцию таких мировых лидеров в области СВЧ-техники, как CPI (США), Thales (Франция), E2V (Великобритания) и Toshiba (Япония). По данным на 2019 год в сегменте народно-хозяйственного рынка электровакуумной СВЧ-техники доля продукции зарубежных компаний составляла более 70%. В первую очередь это было связано с отсутствием на рынке конкурентоспособной линейки СВЧ-изделий отечественного производства.

¹ АО «НПП «Торий», начальник лаборатории магнетронов, kalashnikovtoriy@yandex.ru.

МНОГОЛУЧЕВЫЕ КЛИСТРОНЫ

В большинстве ускорительных установок используются магнетроны. Преимуществом магнетрона является высокий КПД (50–60%), низкое напряжение питания и стоимость, компактные размеры. Недостатки магнетрона – не высокая фазовая и амплитудная стабильность, а также малый срок службы (2000–3000 ч). В то же время клистроны могут работать до 10 тыс. часов благодаря тому, что коллектор, принимающий электроны, и катод, источник электронов, вынесены из пространства взаимодействия. Но, чтобы с помощью традиционного однолучевого клистрона получить те же мощности, что и на магнетронах, требуются значительные уровни напряжения питания. Это обусловлено проблемой удержания пучка в пролетном канале при увеличении тока пучка – электроны расталкиваются и осаждаются на стенках канала. Кроме того, однолучевые клистроны обладают низким КПД (40–50%). Например, чтобы получить выходную импульсную мощность 5,5 МВт, магнетрону M5028 (E2V) требуется напряжение 51 кВ, а однолучевому клистрону VKS 8262E (CPI) для достижения мощности 6 МВт требуется 125 кВ. Для напряжений порядка 120–130 кВ необходимы громоздкие и дорогостоящие источники питания, что исключает использование клистронов на бортовых и мобильных установках. Кроме того, для таких источников питания требуется как специальная защита от высокого напряжения, так и защита от жесткого рентгеновского излучения, которое возникает при напряжениях выше 60 кВ. Для защиты от излучения электронные пушки клистронов помещаются в громоздкие масляные баки. К этому добавляется необходимость использования громоздкого соленоида (типичный вес 100–200 кг) для удержания сильноточного пучка в канале.

Совместить преимущества магнетрона (низкое напряжение питания) и клистрона (высокая стабильность СВЧ-сигнала) удалось в многолучевых клистролах (МЛК). Применение многолучевой конструкции позволило снизить ток одного луча, для фокусировки которого не требуется громоздкий соленоид, достаточно использовать магнитную фокусирующую систему на постоянных магнитах. Это на порядок улучшило массогабаритные характеристики. Кроме того, увеличение числа лучей позволило получить значительно более высокие токи, чем в однолучевых конструкциях, что снизило напряжение питания до 50–55 кВ при сохранении высоких значений выходной импульсной мощности.

В 1986 году АО «НПП «Торий» разработало серию 40-лучевых клистронов S-диапазона длин волн КИУ-111, КИУ-147 и КИУ-168 на частоты 2450 МГц и 2856 МГц с выходной импульсной мощностью 5–6 МВт и средней мощностью 5–25 кВт при напряжении питания 50–52 кВ. Вместо громоздких соленоидов в клистролах для создания требуемого распределения магнитного поля использовались

малогабаритные легкие магнитно-фокусирующие системы на постоянных магнитах (МФС). В настоящее время клистроны используются в терапевтических ротационных ускорителях типа ЛУЭР-20М и ЛУЭР-40М, дефектоскопах типа УЭЛ-10-Д, УЭЛ-8-Д, УЭЛР-3-2.5С, УЭЛВ-10-2Д, УЭЛВ-15-2Д, а также в различных инспекционно-досмотровых комплексах.

Одной из основных тенденций развития СВЧ-техники является увеличение частоты сигнала при сохранении высоких значений импульсных мощностей. Помимо того, что частота обратно пропорциональна размерам резонатора и приборы на большие частоты обладают меньшими размерами (следовательно, и меньшей стоимостью), большие частоты СВЧ-сигнала улучшают разрешающую способность досмотровых комплексов и медицинского оборудования. Кроме того, с увеличением частоты СВЧ-сигнала уменьшаются размеры ускорителя, снижается его стоимость, повышаются эффективность ускорения и предельно допустимый темп набора энергии ускоряющей структуры.

В 2017 году в АО «НПП «Торий» разработали клистрон C-диапазона длин волн с МФС КИУ-271 на частоту 5712 МГц с выходной импульсной мощностью 3,0 МВт и средней мощностью 10 кВт при напряжении питания 45 кВ. Во время испытаний прибора было обнаружено явление искрового разряда между двумя заземленными проводниками (резонаторный блок и коллектор клистрона), разделенными керамическим изолятором, между которыми в вакууме проходил интенсивный электронный поток. При этом наблюдался характерный «дребезг» импульса модулятора, который приводил к выходу из строя питающего оборудования. В результате аналитических расчетов было выявлено, что в сильноточных клистролах (ток катода более 100 А) индуктивность заземляющего отвода и емкость «резонаторный блок – коллектор» придают инерцию изменению наведенного от интенсивного пучка заряда, то есть фактически появляется некоторая электрическая цепь, в которой наведенный движущимся зарядом ток является, фактически, источником, а значит, вызывает и изменение напряжения на проводнике. Данная гипотеза была подтверждена экспериментально: при внесении дополнительной емкости в зазор «резонаторный блок – коллектор» удалось снизить величину наведенного напряжения, убрать отраженный сигнал, тем самым были увеличены токопрохождение с 82 до 94% и, соответственно, импульсная мощность прибора до 3,6 МВт. При этом прибор работал стабильно без искровых разрядов и «дребезга» импульса модулятора.

В АО «НПП «Торий» была разработана программа Collector Bunch Solver (патент № 2019613300), позволяющая учитывать распределение электростатического потенциала конструкций коллектора клистрона. По результатам расчетов был разработан клистрон КИУ-273



Рис. 1.
Клистрон
КИУ-273



Рис. 3.
Клистрон
КИУ-279

(рис. 1) с новой конструкцией коллектора, который продемонстрировал стабильную работу без дополнительных емкостей. Благодаря улучшенным массогабаритным характеристикам клистрона и высокому значению импульсной мощности в 2018 году был создан первый в России мобильный инспекционно-досмотровый комплекс (МИДК) (рис. 2). Кроме того, полученные рекордные результаты как по выходной мощности, так и по массогабаритным характеристикам позволили использовать данный клистрон в качестве источника СВЧ-питания в новом комплексе лучевой терапии рака (КТЛ-6), разрабатываемом в Научно-исследовательском институте технической физики и автоматики (НИИТФА). Клистрон в составе медицинского линейного ускорителя прошел все испытания. Результаты работы были представлены в докладе на международной конференции International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2019), проходившей в Южной Корее в 2019 году.

Кроме того, на предприятии велись работы по улучшению массогабаритных характеристик многолучевых клистронов S-диапазона. В результате, в 2020 году был разработан и изготовлен компактный клистрон с МФС КИУ-279 (габаритные размеры 50×24,7 см) с выходной импульсной мощностью 3 МВт на частоте 2998 МГц при напряжении питания 45 кВ для использования в медицинском оборудовании (по заказу Accelerad Tech (США)) (рис. 3). Прибор прошел полный цикл испытаний в США и подтвердил свои характеристики.



Рис. 2. Мобильный инспекционно-досмотровый комплекс (МИДК)

Несмотря на все преимущества, многолучевые клистроны продолжали уступать магнетронам по уровню КПД. Для решения этой проблемы в ряде работ предлагались методы группировки электронного потока с использованием резонаторов на вторых (и выше) гармониках. Однако, при конструировании резонаторов на вторую гармонику (и тем более на третью), для многолучевых клистронов возникают технологические проблемы – диаметр катода строго ограничен допустимой плотностью тока катода 20 А/см², необходимы конструктивные запасы для катодных обойм с числом лучей более 18. Кроме того, с увеличением номера гармоники возрастают допусковые требования на значение частоты, малейшие отклонения приводят к снижению КПД.

При расчете пролетных клистронов в программе KLYS-5.63, разработанной в АО «НПП «Торий», была выявлена возможность повышения КПД за счет упорядоченной группировки с инверсией частот. Если в традиционной упорядоченной группировке каждый, следующий за входным, резонатор настроен на более высокую частоту, то при группировке с инверсией частот частота $N-2$ резонатора отстраивается по частоте выше предвыходного $N-1$ резонатора (N – число резонаторов). Кроме того, повысить КПД позволяет «тейперинг» – по вычисленным значениям наведенного напряжения на зазорах корректируются значения угла пролета $N-1$ резонатора, соответствующие торможению электронного потока.

В 2022 году данные методы были использованы при создании клистрона с МФС КИУ-284 (рис. 4), предназначенного для комплексов стерилизации и комплексов радиационного воздействия на изделия ЭКБ. Экспериментальный образец показал выходную импульсную мощность 8,9 МВт на частоте 2856 МГц при напряжении питания 58 кВ и токе катода 276 А. Таким образом, удалось увеличить КПД многолучевых клистронов S-диапазона с 40 до 50%.

На данный момент в АО «НПП «Торий» успешно прошел испытания многолучевой клистрон X-диапазона с МФС КИУ-283 (рис. 5), разработанный для медицинских комплексов иностранного производства. Прибор показал выходную импульсную мощность 3 МВт на частоте



Рис. 4.
Клистрон
КИУ-284



Рис. 5. Клистрон
КИУ-283

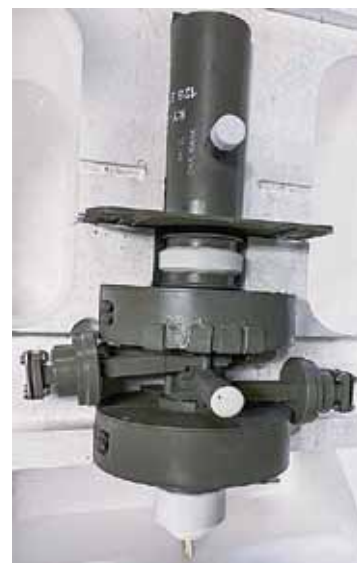


Рис. 6. Клистрон КУ-411

9300 МГц при напряжении питания 55 кВ и рекордном КПД для многолучевых клистронов (особенно X-диапазона), равном 58%.

Таким образом, на предприятии АО «НПП «Торий» создана линейка малогабаритных мощных многолучевых клистронов с МФС (табл. 1), работающих в C-, S- и X-диапазонах длин волн с выходной импульсной мощностью более 3 МВт и техническим КПД не менее 50%, которые могут использоваться в линейных ускорителях электронов широкого гражданского применения и лазерах на свободных электронах. Аналогов данных приборов в мире нет.

КЛИСТРОНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Вторым важным направлением деятельности АО «НПП «Торий» является разработка клистронов непрерывного действия. В 2022 году была поставлена задача по разработке непрерывного клистрона Ku-диапазона длин волн для источника многозарядных ионов в интересах Госкорпорации «Росатом» (АО «НИИЭФА»). Источники многозарядных ионов, основанные на взаимодействии частиц плазмы со сверхвысокочастотными

Таблица 1. Параметры многолучевых клистронов АО «НПП «Торий»

Наименование	Рабочая частота, МГц	Выходная импульсная мощность, МВт	Выходная средняя мощность, кВт	Напряжение катода, кВ
КИУ-111	2450	5	5	50
КИУ-147	2450	5	25	50
КИУ-168	2856	6	5	52
КИУ-268	2856	6	25	52
КИУ-273	5712	3,6	10	45
КИУ-278	2856	8	16	58
КИУ-279	2998	3	7,5	45
КИУ-282	2797	20	61	260
КИУ-283	9300	3	6	55
КИУ-284	2856	8,9	17,8	58

полями в магнитном поле в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), используются практически во всех крупных ускорительных центрах. Пучки ионов востребованы при обработке и модификации твердых тел, в медицине, для нагрева специальных мишеней в установках инерционного термоядерного синтеза и для синтеза новых сверхтяжелых элементов таблицы Менделеева. Экспериментально было подтверждено значительное увеличение выхода многозарядных ионов при переходе от X-диапазона длин волн в Ки-диапазон, но таких источников непрерывной СВЧ-энергии с необходимой мощностью в мире не существовало. В результате ОКР «Вершина» был разработан и успешно испытан миниатюрный клистрон непрерывного действия с МФС КУ-411 (рис. 6), работающий на частоте 14000 МГц с выходной мощностью 2 кВт при КПД не менее 50%.

Кроме того, клистроны непрерывного действия, разработанные в АО «НПП «Торий», находят применение

в составе телевизионных передатчиков, в наземных установках космической и топографической связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день АО «НПП «Торий» является одним из лидеров российского рынка в области мощной вакуумной СВЧ-техники. Помимо разработки и серийного выпуска современных и перспективных электровакуумных СВЧ-приборов и ускоряющих структур для линейных ускорителей электронов, предприятие осуществляет по заказу разработку и изготовление катодных узлов, высокотемпературных электропечей, специальной керамики и магнитных систем. АО «НПП «Торий» выполняет также физико-химический анализ материалов.

Опыт специалистов АО «НПП «Торий», надежность и качество изделий и предоставляемых услуг по достоинству оценили такие заказчики, как: Минобороны России, Концерн ВКО «Алмаз-Антей», ФГБУ «РАН», ГК «Росатом», ИЯИ РАН, Teclor, Scantronic Systems и многие другие. ●

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена за два тома 2420 руб.

СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА В СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

Издание 3-е, исправленное
В 2-х книгах

Белоус А. И., Мерданов М. К., Шведов С. В.

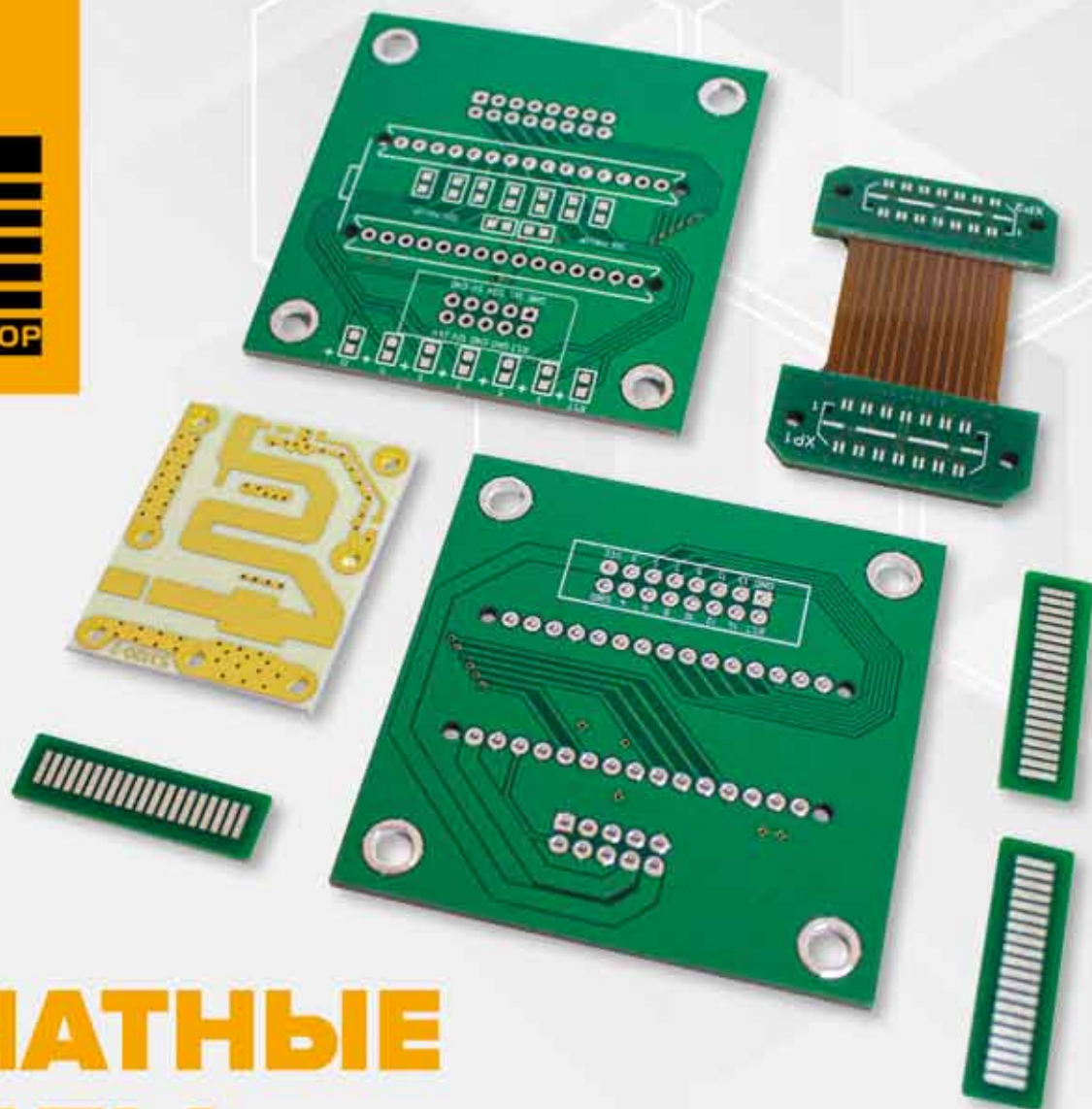
Впервые в отечественной научно-технической литературе в объеме одной книги детально рассмотрены теоретические основы, физические механизмы и принципы работы всех известных СВЧ-приборов и типовых устройств на их основе, методы расчета и конструирования, базовые технологические, схематехнические и конструктивные особенности каждого класса СВЧ-приборов, а также наиболее распространенных технических решений радиоэлектронных систем на их основе — от РЛС и телекоммуникационных устройств различного назначения до СВЧ-оружия наземного и космического применения. Энциклопедия оформлена в двух книгах и содержит 18 глав.

Книга 1
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — 782 с.,
ISBN 978-5-94836-605-0
Цена 1210 руб.

Книга 2
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — 702 с.,
ISBN 978-5-94836-606-7
Цена 1210 руб.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru



ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПО ТЗ ЗАКАЗЧИКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ДО 5 КЛАССА ТОЧНОСТИ

ХАРАКТЕРИСТИКА	ОДНОСТОРОННИЕ, ДВУСТОРОННИЕ И МНОГОСЛОЙНЫЕ	ГИБКО-ЖЕСТКИЕ
Используемые материалы	FR4, FR4 HiTg, Rogers	FR4 HiTg, Rogers 4000 серии, полиимиды Taiflex, Shengyi, Dupont Pyralux
Макс. количество слоев	<ul style="list-style-type: none"> Для плат на FR4 до 20 слоев Для плат на Rogers до 10 слоев 	<ul style="list-style-type: none"> Жесткая часть до 12 слоев Гибкая часть до 6 слоев
Размер рабочего поля	<ul style="list-style-type: none"> Для FR4 400 × 300 мм Для Rogers 250 × 180 мм 	250 × 180 мм
Финишные покрытия	<ul style="list-style-type: none"> ПОС-63 Иммерсионное золочение Иммерсионное олово Иммерсионное серебро 	<ul style="list-style-type: none"> Иммерсионное золочение Иммерсионное олово Иммерсионное серебро
Технологические возможности	Минимальный зазор между проводниками: 0,1 мм	
	Минимальная ширина проводника: 0,1 мм	
	Минимальный диаметр переходного отверстия: 0,2 мм	
	Минимальная площадка переходного отверстия: 0,4 мм	