

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ КЛИНОТРОНОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Е. Е. Лысенко, О. Ф. Пишко, В. Г. Чумак, С. А. Чурилова

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
4, ул. Краснознаменная, Харьков, 61002, Украина
E-mail: pishko@rian.kharkov.ua*

Представлены результаты разработки и внедрения пакетированных клинотронов непрерывного действия миллиметрового диапазона (частоты 58-300 ГГц). Приведены энергетические и частотные характеристики приборов. Указаны возможности совершенствования приборов и расширения области их применения. Ил. 6. Библиогр.: 23 назв.

Ключевые слова: источник колебаний, миллиметровый диапазон, клинотрон.

В середине прошлого века стало очевидно, что миллиметровый диапазон радиоволн может найти применение в радиолокации, радиоастрономии, для организации защищенных каналов связи, в изучении живой и неживой природы и т. д. Для освоения этого диапазона необходимо было создать элементную базу (средства генерации, приема, канализации колебаний, измерительную технику) и изучить свойства этих волн и особенности их распространения в атмосфере.

Перед Институтом радиофизики и электроники (ИРЭ) АН УССР, руководимого в те годы А. Я. Усиковым, стояла задача комплексного решения этих проблем. В институте были созданы подразделения, которые занимались разработкой источников колебаний (импульсных и непрерывных магнетронов, ламп обратной волны (ЛОВ), клинотронов), линий передач, измерительной техники и инструментов для изучения свойств миллиметрового диапазона [1]. Эти задачи решались весьма успешно, о чем свидетельствуют Государственные и другие премии, присуждаемые руководителям и исполнителям работ. Один из лауреатов Ленинской премии (1960 г.) Григорий Яковлевич Левин – автор источника колебаний миллиметрового диапазона типа ЛОВ – клинотрона [2, 3]. Этот прибор, безынерционно перестраиваемый в широком частотном диапазоне, позволяет получать выходные мощности, на порядок и более превышающие мощности обычных ЛОВ. Особенности принципа работы клинотрона – необходимость наклона электронного пучка к поверхности замедляющей системы, требовали новых конструкторских и технологических разработок элементов прибора. В отличие от ЛОВ необходимы были «толстые» и широкие по сравнению с замедленной длиной волны электронные пучки, широкие замедляющие системы, способные рассеивать большие уровни мощности, новые поглощающие нагрузки на коллекторном конце замедляющей системы, способные выдерживать бомбардировку электронами пучка и

т. д. Такие разработки были выполнены и уже на первых клинотронах в 8-мм диапазоне были получены мощности более десяти ватт, что существенно превышало мощности обычных ЛОВ [4]. Полученные уровни выходной мощности позволяли использовать клинотроны в радиолокации, для целей радиоразведки, в создании измерительной аппаратуры, в исследовании свойств различных материалов, характеристик распространения и затухания миллиметровых волн и т. д.

На моделях клинотронов в диапазоне 30-37,5 ГГц проводились экспериментальные исследования, которые позволили объяснить физику работы клинотронов [4]. Было показано, что в отсутствие пульсаций электронного пучка необходимость наклона пучка к поверхности замедляющей системы обусловлена нелинейными эффектами. Наклон позволяет исключить перегруппировку электронов и при оптимальных размерах пространства взаимодействия полезно использовать все электроны пучка и получить максимальные КПД и выходную мощность. В стартовом режиме минимальный ток наблюдается, когда электроны двигаются параллельно замедляющей системе.

При наличии пульсаций в электронном пучке его наклон к поверхности замедляющей системы позволяет улучшить условия взаимодействия пучка с полем по сравнению с параллельным пучком и в рабочем, и в стартовом режимах [4, 5].

В 1960-е гг. были выполнены также теоретические исследования, позволившие обосновать экспериментально полученные данные. Это работы А. С. Победоносцева и А. С. Тагера, В. С. Андрушкевича и Ю. Г. Гамаюнова, В. Н. Шевчика и И. А. Манькина, которые были опубликованы в специальных изданиях. В настоящее время теоретические исследования продолжаются [6-8].

Следует отметить, что в первых образцах клинотронов по аналогии с ЛОВ использовались длинные замедляющие системы (35 мм), поэтому приборы могли работать только в электромагнитах, которые обеспечивали в рабочем зазоре маг-

нитные поля порядка 0,3 Т, необходимые для удержания электронного пучка.

Поэтому при дальнейшем развитии клинотронов одновременно с решением задач по освоению новых участков диапазонов, увеличению выходной мощности, улучшению других выходных характеристик приборов большое внимание уделялось вопросам улучшения их эксплуатационных характеристик, в частности, уменьшению веса и габаритов, созданию пакетированных конструкций.

1. Клинотроны диапазона 140, 200, 300 ГГц. Одной из первоочередных стояла задача укорочения длины волны. Это во многом было вызвано необходимостью решения актуальной задачи контроля высокотемпературной плазмы в установках термоядерного синтеза. В диапазонах 140 и 200 ГГц для диагностики плазмы разрабатывались многоканальные интерферометры, требующие источников колебаний повышенной мощности, электрически перестраиваемых в широком диапазоне частот.

При разработке клинотронов коротковолновой части миллиметрового диапазона пользовались принципами масштабного моделирования. Геометрия замедляющей системы рассчитывалась, исходя из необходимой дисперсионной зависимости. Выбираемые ширина и длина системы определялись возможностями формирования электронного пучка нужной формы и плотности, а также необходимым магнитным полем. При расчетах на новые участки миллиметрового диапазона оставались постоянными длина пространства взаимодействия, ускоряющие напряжения, величина анодного тока, отношение толщины пучка к длине волны.

Эти разработки потребовали новых решений целого ряда конструкторских и технологических задач. Была предложена и реализована технология изготовления мелкоструктурных замедляющих систем с использованием резака, обеспечивающая необходимую точность изготовления и чистоту поверхности [4].

Значительное внимание было уделено электронно-оптической системе. С укорочением длины волны высокочастотное поле замедляющей системы сосредотачивается все в более тонком слое у ее поверхности, поэтому для эффективного взаимодействия электронного пучка с полем замедляющей системы необходимо формировать широкие и тонкие (0,1-0,2 мм) электронные потоки с малыми пульсациями границы пучка и большими плотностями тока. Использование клинотронного эффекта (наклона пучка к поверхности замедляющей системы) частично снижает требования к электронным пучкам, но все же они остаются довольно жесткими. В разрабатываемых клинотронах в качестве электронно-оптической системы использовалась диодная

пушка с увеличенным асимметричным анодным отверстием [4, 9]. Такая пушка формирует ленточный поток с уменьшенной амплитудой пульсаций его границы, что повышает эффективность взаимодействия электронов с высокочастотным полем замедляющей системы и позволяет уменьшить значения требуемых фокусирующих магнитных полей. Эмиттером служит вольфрамовый пропитанный катод специальной формы с размерами (0,1-0,2)×2,5 мм², обеспечивающий плотность тока пучка до 80 А/см² [4, 10]. В дальнейшем было предложено еще несколько технических решений, позволивших уменьшить потребляемую катодно-подогревательным узлом мощность, увеличить плотность тока до 100 А/см² при уменьшенной эмитирующей поверхности катода, улучшить качество пучка за счет снижения влияния ионной бомбардировки катода [11]. Это позволило расширить полосу генерации, увеличить выходную мощность приборов, повысить их надежность и срок службы.

Как указывалось выше, необходимо было создать приборы, которые могли бы при высоких выходных характеристиках работать в постоянных магнитах малого веса и габаритов. С этой целью были проведены исследования, позволившие выбрать размеры пространства взаимодействия с длиной замедляющей системы, обеспечивающей общую длину прибора не более 29 мм. Такая длина прибора позволила создать пакетированную конструкцию клинотрона на основе постоянного магнита из сплава альнико весом 14 кг, обеспечивающего в зазоре 32 мм магнитное поле 0,32-0,36 Т. В пакетированных клинотронах использовались замедляющие системы без поглощающей нагрузки на коллекторном конце, однако это не мешало в коротковолновой части миллиметрового диапазона получать полосу перестройки приборов без разрывов порядка 15 %. Такие приборы были освоены Опытным производством, созданным при ИРЭ в 1960 г., выпускались мелкими сериями и поставлялись по требованию заказчиков. Мощность приборов диапазона 140 ГГц в таких магнитных системах составляла 0,1-1 Вт [3, 4].

Появление магнитных материалов с большой коэрцитивной силой, одним из которых является сплав самария с кобальтом, дало возможность значительно улучшить эксплуатационные характеристики пакетированных приборов: уменьшить вес и габариты клинотронов мм диапазона, создать пакетированные конструкции клинотронов субмиллиметрового (субмм) диапазона. В СКТБ ИРЭ АН УССР были созданы магнитные фокусирующие системы с напряженностью магнитного поля в зазоре 31 мм 0,42 Т весом 1 кг. Системы с таким весом и габаритами по эф-

фективности не имели аналогов. При их создании применен метод синтеза, который позволяет получить для заданного поля и типа зазора максимально эффективную конструкцию магнитной фокусирующей системы [12]. Специфика конструкции самарий-кобальтовых магнитных систем позволила предложить новый способ юстировки клинотронов, который обеспечивает большую надежность крепления прибора, дает некоторый выигрыш в величине магнитного зазора [13].

При литой конструкции магнитной системы из альнико юстировка клинотронов в магнитном поле по максимуму генерируемой мощности осуществлялась с помощью специальных устройств, имеющих необходимое число степеней свободы. Самарий-кобальтовая магнитная система конструктивно представляет собой две шайбы – магнитные полюса, установленные в обойму, которая может быть изготовлена из немагнитного материала. В обойме магнитной системы прибор крепится неподвижно. Наклон пучка к поверхности замедляющей системы осуществляется вращением магнитных полюсов, расположенных эксцентрично по отношению друг к другу, вокруг продольной оси зазора [13]. В таких магнитных системах работают клинотроны миллиметрового диапазона длин волн до частоты 150 ГГц, обеспечивая мощности в несколько ватт. Для клинотронов более коротковолновых диапазонов используются самарий-кобальтовые магниты большей массы и габаритов. Для примера приведем рабочие характеристики образцов приборов коротковолновой части миллиметрового диапазона.

На рис. 1 показана зависимость выходной мощности от частоты клинотрона диапазона 140 ГГц, пакетированного в самарий-кобальтовой магнитной системе весом 1 кг. Максимальная мощность $P_{out} \sim 3,25$ Вт была получена при анодном напряжении 3,8 кВ и анодном токе 115 мА, полоса перестройки $\sim 9\%$ без разрывов дисперсионной характеристики. На рис. 2 и 3 приведены аналогичные зависимости для клинотронов диапазонов 200 и 270 ГГц соответственно, пакетированных в неоптимизированные самарий-кобальтовые магнитные системы весом 6 кг и напряженностью магнитного поля в зазоре 31 мм порядка 0,85 Т. Клинотрон в рабочем диапазоне $f \sim 180-215$ ГГц обеспечивал полосу перестройки $\sim 18\%$ без разрывов дисперсионной характеристики и имел максимальную выходную мощность $P_{out} \sim 690$ мВт при напряжении 2,6 кВ и токе 110 мА (рис. 2), в рабочем диапазоне $f \sim 255,1-285,2$ ГГц максимальная выходная мощность составляла $P_{out} \sim 350$ мВт при напряжении 4,3 кВ и токе 220 мА (рис. 3).

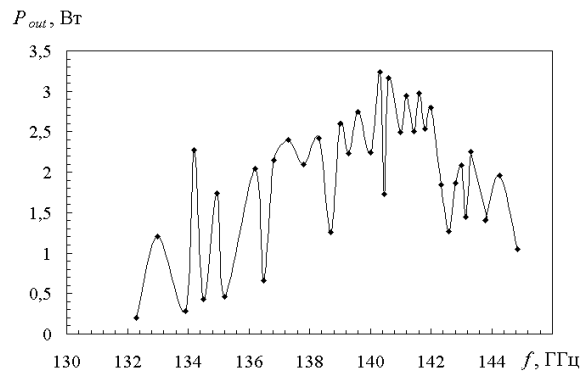


Рис. 1. Зависимость выходной мощности от частоты клинотрона диапазона 140 ГГц. Интервал изменения анодного напряжения от 3,0 до 4,8 кВ, анодного тока от 100 до 130 мА

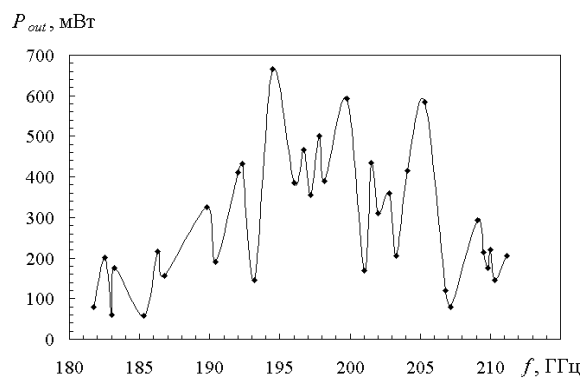


Рис. 2. Зависимость выходной мощности от частоты клинотрона диапазона 200 ГГц. Интервал изменения анодного напряжения от 2,2 до 3,8 кВ, анодного тока от 80 до 130 мА

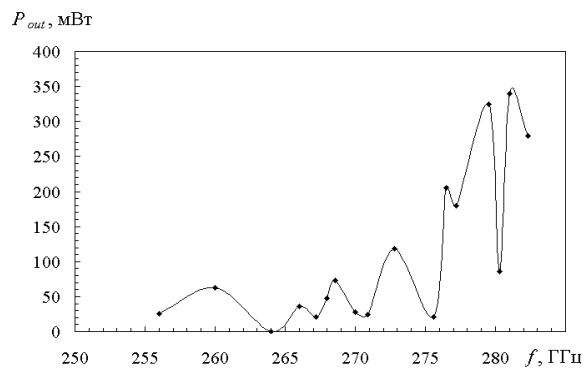


Рис. 3. Зависимость выходной мощности от частоты клинотрона диапазона 270 ГГц. Интервал изменения анодного напряжения от 3,3 до 4,4 кВ, анодного тока от 190 до 240 мА

Клинотроны коротковолновой части мм диапазона использовались не только в системах для диагностики плазмы, но и спектроскопии, для накачки в квантовых парамагнитных усилителях [14], для создания линий передач и измерительной аппаратуры [15], а также изготавливались по заказам различных организаций для выполнения специальных работ.

Одновременно с этими работами изучалась возможность создания новой модификации клинотрона с более высокими выходными характеристиками. Для повышения эффективности вывода электромагнитной энергии был предложен и осуществлен распределенный квазиоптический вывод энергии. Прибор, получивший название клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии [4], впервые был разработан в ИРЭ и не имеет аналогов.

В качестве замедляющей системы в этом приборе была применена открытая многоступенчатая гребенка, важнейшим свойством которой является наличие в спектре собственных волн быстрых пространственных гармоник, отрывающихся от поверхности системы. Эта особенность лежит в основе принципа работы генератора, который заключается в том, что при возбуждении открытой многоступенчатой замедляющей системы электронным пучком над ней в свободном пространстве формируется диаграмма направленности излучения, характеристики которой обусловлены размерами и геометрией системы, что позволяет осуществить вывод энергии. Направление излучения главного лепестка и вид диаграммы направленности меняется по диапазону перестройки [16]. Для целей согласования генератора с линией передачи и учитывая особенности его конструкции, выбор геометрии многоступенчатой замедляющей системы и режимов работы прибора необходимо осуществлять таким образом, чтобы максимум мощности генерации и формирование однолепестковой диаграммы направленности по нормали к поверхности замедляющей системы наблюдались при одном и том же режиме. На образцах клинотронов с распределенным квазиоптическим выводом энергии в диапазоне 140 ГГц была получена выходная мощность около 5 Вт, что превышает значения выходной мощности, полученные при тех же условиях на клинотронах с волноводным выводом энергии [17]. Совмещение в одном приборе генератора и антенны позволяет существенно расширить область его возможных применений.

2. Клинотроны диапазона 90 ГГц. Постановка вопроса об освоении диапазона 90 ГГц клинотронами связана с работами по электродинамическому моделированию. Клинотроны этого диапазона использовались в комплексах для исследования радиолокационных характеристик различных объектов на их моделях. Для выполнения этих исследований требовалось создать клинотрон с уровнем выходной мощности не менее 1,5 Вт в пакетированном исполнении.

Измерительные комплексы могли работать в нестационарных условиях, поэтому определенные сложности вызывало охлаждение приборов проточной водой. Выпускаемые промышленностью автономные агрегаты с замкнутым контуром однофазного жидкого теплоносителя

имели большой вес (40 кг) и недостаточную мощность теплорассеяния (350 Вт). Необходимая система охлаждения была создана совместно с Институтом проблем материаловедения НАН Украины на основе низкотемпературной тепловой трубы [18], общий вес прибора с системой охлаждения составлял 5,6 кг. Такая система охлаждения не требует специальных мер и при эксплуатации в условиях отрицательных температур, поскольку тепловая труба допускает режим запуска из «замороженного» состояния. Выходные характеристики приборов, использующих автономную систему охлаждения на основе тепловой трубы, были на уровне характеристик клинотронов с принудительным водяным охлаждением. Такая разработка была выполнена впервые, ранее тепловые трубы не применялись в системах охлаждения клинотронов, и в литературе не имелось сведений по их применению в системах охлаждения приборов этого класса (ЛОВ, карсинотрон). Характеристика одного из приборов приведена на рис. 4, где в зависимости от частоты показано изменение выходной мощности.

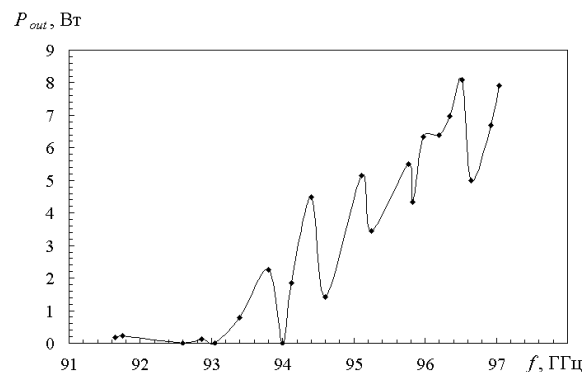


Рис. 4. Зависимость выходной мощности от частоты клинотрона диапазона 94 ГГц с системой охлаждения на основе тепловой трубы. Интервал изменения анодного напряжения от 3,0 до 4,0 кВ, анодного тока от 100 до 150 мА

Максимальная выходная мощность $P_{out} \sim 8$ Вт была получена при анодном напряжении 3,8 кВ и анодном токе 140 мА. Аналогичная характеристика прибора с водяным охлаждением этого диапазона представлена на рис. 5, максимальная выходная мощность $P_{out} \sim 6$ Вт была получена при анодном напряжении 3,45 кВ и анодном токе 130 мА. Полоса перестройки приборов 10-15 %. Оба прибора работали в магнитной фокусирующей системе весом 1 кг с напряженностью магнитного поля 0,42 Т.

3. Клинотроны диапазона 60 ГГц. Описанные выше клинотроны использовались в различных радиолокационных системах (например, в скаттерометрах [19]), так как частоты 94, 140 и 220 ГГц находятся в «окнах прозрачности» атмосферы.

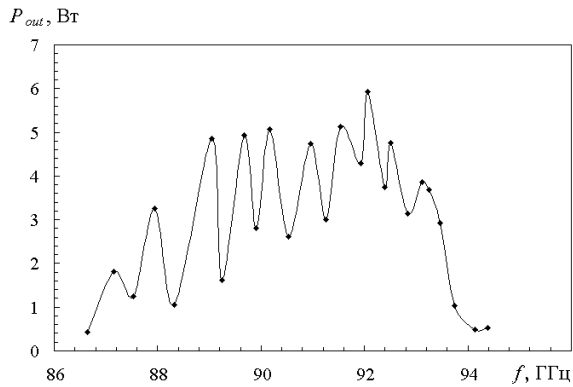


Рис. 5. Зависимость выходной мощности от частоты клинотрона диапазона 94 ГГц с водяным охлаждением. Интервал изменения анодного напряжения от 2,5 до 4,5 кВ, анодного тока от 100 до 150 мА

Однако в последнее время значительный интерес стал проявляться к диапазону 60 ГГц, хотя эта частота находится в полосе интенсивного поглощения, обусловленного наличием кислорода в атмосфере. Судя по литературе [20], частота 60 ГГц оказалась интересной, в частности, с точки зрения создания помехозащищенной и конфиденциальной системы связи на близкие расстояния, а также беспроводной передачи данных с большой скоростью и высокой пропускной способностью каналов связи. Кроме того, известно, что электромагнитные волны миллиметрового диапазона применяются в медицине для микроволновой резонансной терапии (МРТ). В лечебных целях наиболее часто используются частоты 42,2 ГГц ($\lambda=7,1$ мм), 53,6 ГГц ($\lambda=5,6$ мм) и 61,5 ГГц ($\lambda=4,9$ мм) [21].

Созданию образцов клинотронов указанного диапазона предшествовал большой объем теоретических и экспериментальных исследований. Цель этих исследований – выбор оптимальных размеров пространства взаимодействия [8] и выяснение возможности получения широкой полосы перестройки без разрывов дисперсионной характеристики. В диапазонах 90-300 ГГц разрывов не наблюдалось в полосе 10-15 %, а дисперсионная кривая клинотронов диапазона 37 ГГц имела разрывы. Разрывы в дисперсионной характеристике связаны с тем, что замедляющие системы в пакетированных приборах имеют малую длину и не имеют нагрузки на коллекторном конце. При больших коэффициентах отражения может наблюдаться срыв генерации, который нельзя устранить улучшением условий взаимодействия пучка с электромагнитным полем замедляющей системы (увеличением плотности тока, напряженности магнитного поля и т. д.). Экспериментально было установлено, что для получения непрерывной полосы генерации необходимо обеспечить в выходном волноводе КСВН ≤ 3 [22]. Была поставлена задача создания клинотрона, имеющего непрерыв-

ную полосу перестройки в диапазоне 58-65 ГГц с минимальной мощностью 1 Вт [23].

В результате проведенных исследований и разработок создан клинотрон в диапазоне 57,5-65,5 ГГц, который имеет полосу без разрывов около 13 % и обеспечивает максимальную мощность более 20 Вт и минимальную не менее 1 Вт. На рис. 6 приведена зависимость выходной мощности от частоты для этого прибора. Максимальная мощность $P_{out} \sim 22$ Вт была получена при анодном напряжении 4,5 кВ и анодном токе 200 мА. Прибор работает в оптимизированной самарий-кобальтовой магнитной фокусирующей системе с напряженностью магнитного поля $H=0,42$ Т весом 1 кг.

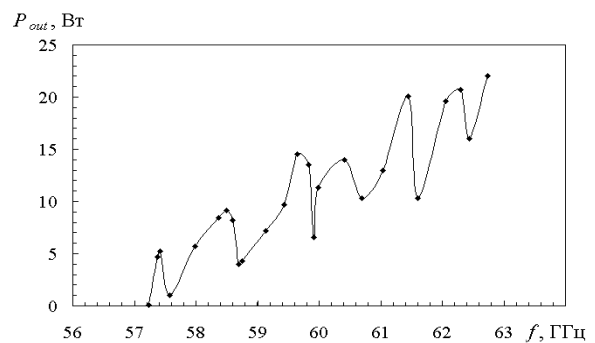


Рис. 6. Зависимость выходной мощности от частоты клинотрона диапазона 60 ГГц. Интервал изменения анодного напряжения от 2,8 до 4,5 кВ и анодного тока от 170 до 200 мА

В настоящее время нами разрабатывается клинотрон диапазона 54-64 ГГц с целью применения в медицине для фирмы *AccelBeam Devices, LLC* («AccelBeam»), USA.

Выводы. Развитие клинотронов во многом определялось возможностями техники и технологии времени и конкретными задачами, которые решались в различных областях науки и техники в данный момент. Клинотрон являлся единственным прибором, который при широкой полосе и безынерционной перестройке обеспечивал такие высокие уровни мощности. Эти характеристики прибора остаются уникальными и до настоящего времени. Широкое применение клинотронов в стационарных и нестационарных условиях вызвало необходимость улучшать их эксплуатационные характеристики. Прибор, ранее работавший в электромагните весом в сотни килограммов, стал пакетированным прибором весом порядка 1 кг. В настоящее время проводятся работы по созданию малогабаритного блока питания клинотрона с необходимыми параметрами, что позволит такому генератору быть вполне конкурентноспособным на мировом уровне.

Нами приведены характеристики приборов некоторых участков мм диапазона. В действительности же клинотроны изготавливались во всем миллиметровом диапазоне для обеспечения самых раз-

личных работ и исследований. Например, клинотрон диапазона 300 ГГц используется для диэлектротометрии материалов с малыми потерями в радиоспектроскопе «Буран», который имеет статус национального достояния Украины. Наши разработки использовались в Институте атомной энергии, Россия; *Elva-1 Millimeter Wave Division, St. Petersburg, Russia* [23]; *Technische Universitat Hamburg-Harburg, Germany*; *Dartmouth College, Hanover, USA*. В настоящее время в возможности приобретения клинотронов заинтересованы, в частности, такие организации как: в диапазоне 94 ГГц – *TUBITAK-MRC*, Турция; в диапазоне 60 ГГц – *AccelBeam Devices, LLC («AccelBeam»)*, USA.

Начиная с 1960-х гг., в ИРЭ также проводились исследования по созданию клинотронов субмиллиметрового диапазона длин волн для диагностики плазмы, что дало возможность разработать приборы на частоты до 545 ГГц. Такие клинотроны в настоящее время работают в оптимизированных магнитных фокусирующих системах весом 11 кг и обеспечивают мощности порядка 100 мВт [4, 17].

Возможности разработок и поставок клинотронов в нужных участках диапазонов имеются и в настоящее время.

1. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / Под ред. А. Я Усикова. – Киев: Наук. думка, 1986. – 366 с.
2. А.с. 341113 СССР, МКИ. Лампа обратной волны / Г. Я. Левин // Открытия. Изобретения. – 1972. – № 25. – С. 201.
3. Кириченко А. Я., Яковенко В. М. Клинотрон – 50 // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2007. – 12, спец. вып. – С. 5-13.
4. Клинотрон / Под ред. А. Я. Усикова. – Киев: Наук. думка, 1992. – 200 с.
5. Кириченко А. Я. Влияние пульсаций границы электронного потока на пусковые характеристики ЛОВ // Тр. ИРЭ АН УССР. – 1964. – 12. – С. 162-173.
6. Одаренко Е. Н., Шматько А. А. Самовозбуждение колебаний в резонансных генераторах О-типа с длительным взаимодействием при наклонном магнитостатическом поле // Радиотехника и электроника. – 1992. – 37, № 2. – С. 303-310.
7. Ваерив Д. М. Теория клинотрона // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2007. – 12, спец. вып. – С. 35-47.
8. Пишко О. Ф., Чурилова С. А. Моделирование пространства взаимодействия в клинотронах миллиметровых и субмиллиметровых длин волн // Успехи совр. радиоэлектрон. Зарубежн. радиоэлектрон. – 2004. – Вып. 1. – С. 10-19.
9. Бородин А. И., Вигдорчик В. И., Чурилова С. А. Исследование формирования электронного пучка диодной пушкой в продольном магнитном поле // Электрон. техника. Сер. 1. Электрон. СВЧ. – 1968. – № 11. – С. 41-50.
10. А.с. 1542318 СССР, МКИ. Диодная электронная пушка для формирования тонких ленточных электронных потоков / А. И. Бородин, Л. А. Кириченко, И. А. Княженко и др. // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 6. – С. 197.
11. Чумак В. Г., Чурилова С. А. Электронная пушка для клинотронов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов // Радиофизика и радиоастрономия. – 2002. – 7, № 2. – С. 175-179.
12. Капитонов В. Е. Оптимизация магнитных фокусирующих систем методом синтеза // Электроника миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Киев: Наук. думка, 1988. – С. 172-178.

13. А.с. 1542318 СССР, МКИ Электровакuumный СВЧ прибор О-типа / Е. Е. Лысенко, В. В. Смородин // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 5. – С. 213.
14. Лысенко Е. Е., Пишко О. Ф., Чурилова С. А. Источники накачки квантовых парамагнитных усилителей миллиметрового диапазона // XVII Всесоюз. конф. «Радиоастрономическая аппаратура» (Ереван 1985 г.): Тез. докл. – Ереван, 1985. – Т. 1. – С. 10-11.
15. Отчет по НИР «Олива» / Рук. Е. М. Кулешов. – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники АН УССР. – 1971. – С.
16. Лысенко Е. Е., Пишко О. Ф., Чурилова С. А. Экспериментальные исследования клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – 4, № 1. – С. 13-19.
17. Лысенко Е. Е., Пишко О. Ф., Чумак В. Г., Чурилова С. А. Состояние разработок клинотронов непрерывного действия // Успехи совр. радиоэлектрон. Зарубежн. радиоэлектрон. – 2004. – Вып. 8. – С. 3-12.
18. Гурбич Н. Л., Лысенко Е. Е., Мороз А. Л. и др. Система охлаждения клинотрона на тепловой трубе // Электрон. техн. Сер. 1. Электрон. СВЧ. – 1992. – 2(446). – С. 3-5.
19. Лысенко Е. Е., Руженцев Н. В., Пишко О. Ф., Чурилова С. А. Клинотронный генератор для скаттерометра 3-мм диапазона // I Всесоюз. науч.-техн. симпозиум «Дистанционное зондирование земных покровов радиометодами»: Тез. докл. – М.: Радио и связь. – 1985. – С. 34.
20. www.telecomskorea.com
21. Деятков Н. Д., Голант М. Б., Бецкий О. В. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. – М.: Радио и связь, 1991. – 168 с.
22. Лысенко Е. Е., Пишко О. Ф., Чумак В. Г., Чурилова С. А. Добротность резонансной линии клинотронов миллиметрового диапазона // Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – 6, № 4. – С. 317-322.
23. www.elva-1.com/pdf/clinotron_user_manual_ver

CURRENT TENDENCIES IN THE DEVELOPMENT OF MILLIMETER WAVELENGTH CLINOTRONS

E. E. Lysenko, O. F. Pishko, V. G. Chumak, S. A. Churilova

The paper presents some results of developing and adoption packaged CW clinotrons for the millimeter waveband (frequencies between 58 and 300 GHz). Power and frequency characteristics of the instruments are given. Possible ways of improving the performance and extending the area of application are indicated.

Key words: source of oscillations; millimeter wavelengths; clinotron.

ТЕНДЕНЦІ РОЗВИТКУ КЛІНОТРОНІВ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Є. Є. Лисенко, О. Ф. Пішко, В. Г. Чумак, С. А. Чурилова

Подано результати розробки та впровадження пакетованих клінотронів безперервної дії міліметрового діапазону довжин хвиль (частоти 58-300 ГГц). Наведені енергетичні та частотні характеристики приладів. Вказані можливості удосконалення приладів та розширення області їх застосування.

Ключові слова: джерело коливань, міліметровий діапазон, клінотрон.

Рукопись поступила 11 июня 2008 г.