

**А.А. Лихачев¹, А.А. Даник¹, Ю.С. Ковшов¹,
С.А. Кишко¹, С.С. Пономаренко¹, Э.М. Хуторян¹,
А.Н. Кулешов¹, А.С. Тищенко¹, В.В. Завертанный¹,
А.Ф. Забродский¹, С.Н. Терехин¹, Т.В. Кудинова¹, Л.А. Кириченко¹,
Л.А. Галушко¹, Ю.С. Клещева¹, Г.С. Безродная¹, С.А. Власенко^{1,2}**

¹Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

²Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина
E-mail: jeanalexkh@gmail.com

Разработка компактных генераторных комплексов на основе клинотронов терагерцевого диапазона в ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины

Предмет и цель работы. В статье изложены результаты, достигнутые в последнее время в отделе вакуумной электроники Института радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова Национальной академии наук Украины при создании компактных комплексов для генерации электромагнитного излучения в терагерцевом (ТГц) диапазоне частот. Данные комплексы, использующие клинотроны в качестве генератора электромагнитных колебаний, предназначены для проведения экспериментальных исследований в области спектроскопии ядерного магнитного резонанса с применением техники динамической поляризации ядер.

Методы и методология работы. Для расчета частотных характеристик модель электронно-волнового взаимодействия клинотрона дополнена алгоритмом учета взаимных преобразований и отражений на неоднородностях электродинамической системы, распространяющихся поверхностной и высших волн. Для уточнения полученных результатов применены методы статистического анализа экспериментальных параметров известных клинотронов. Установлены значения оптимального сдвига фаз колебаний на период замедляющей системы (ЗС), параметров пространственного заряда, длины ЗС и усиления по Пирсу в зависимости от частоты.

Результаты работы. Проведены теоретические и экспериментальные исследования процессов транспортировки интенсивных электронных пучков (ЭП) в слабонеоднородных магнитных фокусирующих полях, электронно-волнового взаимодействия ЭП с высокочастотными (ВЧ) полями ЗС, распространения поверхностных и высших волн, их взаимной трансформации на неоднородностях электродинамической системы. Исследованы омические ВЧ-потери, вызванные шероховатостью поверхности ЗС и тепловым воздействием со стороны падающего ЭП. Экспериментально получена генерация колебаний в пакетированных клинотронах в диапазоне частот от 120 до 410 ГГц. Разработанные комплексы демонстрируют стабильность частоты генерируемого электромагнитного излучения на уровне 1...30 мд в диапазоне частот 120...410 ГГц и обеспечивают уровень выходной мощности порядка 100 мВт на частоте 300 ГГц.

Заключение. Предложены пути повышения мощности и стабильности генерации клинотронов ТГц-диапазона частот. Рассмотрены методы снижения влияния омических ВЧ-потерь на процесс электронно-волнового взаимодействия в клинотронах ТГц-диапазона путем применения многоступенчатых ЗС, а также систем с малым параметром длины.

Ключевые слова: клинотрон, терагерцевое излучение, динамическая поляризация ядер, ядерно-магнитный резонанс, спектроскопия, высоковольтные источники питания, высокочастотные омические потери, замедляющая система.

Актуальность разработки компактных источников электромагнитного излучения в терагерцевом (ТГц) диапазоне частот определяется обилием существующих на данном участке спектра технологий, которые призваны решать современные задачи дистанционного зондирования, коммуникации, спектроскопии, неразрушающего контроля соединений, безопасности и др. [1–5]. Для множества задач, особенно связанных с исследованием биологических объектов, являются избыточными уровни мощности электромагнитного излучения, создаваемые такими мощными приборами как мазеры на циклотронном резонансе [3, 6, 7]. В тоже время полупроводниковые генераторы электромагнитного излучения позволяют достигать мощности порядка 50 мВт на частоте около 300 ГГц [8, 9]. Для работы на более высоких частотах применяются умножители частоты, что приводит к значительному снижению уровня мощности – до нескольких десятков или сотен микроватт [10]. В силу этого обстоятельства такие электронно-вакуумные приборы (ЭВП), в частности, лампы обратной волны (ЛОВ) и их модификации [11–14], являются более пригодными для создания компактных комплексов для генерирования ТГц-излучения, в том числе и благодаря возможности электронной перестройки частоты ускоряющим напряжением. Особенно перспективной является модификация резонансной ЛОВ – клинотрон, основополагающие принципы работы которого были предложены в ИРЭ НАНУ в 1950-х годах [15–17]. Клинотроны, разработанные в последние годы в ИРЭ НАНУ для частот 200...400 ГГц, характеризуются широким частотным диапазоном работы благодаря электронной перестройке частоты (порядка 10...20 %) и уровнем мощности 20...600 мВт [18–22].

В данной статье представлены результаты, полученные при решении задачи создания компактных модулей для генерации электромагнитного излучения в ТГц-диапазоне частот на основе клинотронов. Работа состоит из трех основных разделов. В первом разделе рассмотрены вопросы теории клинотронов ТГц-диапазона частот. Изложены используемые теоретические методики и результаты расчетов. Во втором разделе представлены результаты экспериментального исследования клинотронов,

пакетированных в компактные фокусирующие системы на постоянных магнитах, в ТГц-диапазоне частот. В третьем разделе представлены результаты, полученные при создании компактных высоковольтных источников питания, источников питания накальных цепей, а также рассмотрены вопросы стабилизации выходных параметров таких источников с использованием техники пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) контроля.

1. Разработка клинотронов непрерывного действия в ТГц-диапазоне частот. При разработке клинотронов ТГц-диапазона частот приходится решать вопросы, связанные как с физическими особенностями работы ЭВП О-типа, так и с технологическими ограничениями, возникающими в результате необходимости создания мелкоструктурных гребенчатых замедляющих систем (ЗС).

Важным физическим ограничением является уменьшение локализации высокочастотного (ВЧ) электромагнитного поля вблизи поверхности ЗС при уменьшении периода и глубины целевого резонатора гребенки. Так, толщина эффективного слоя ВЧ-поля на частоте 400 ГГц составляет 15 мкм [18, 20].

В отличие от ЛОВ традиционной конструкции, применение наклонного электронного потока (ЭП) в клинотроне позволяет ввести практически все электроны пучка в область ВЧ-поля. Тем не менее, при продвижении в ТГц-диапазоне необходимо использовать более тонкие ЭП по сравнению с пучками для клинотронов миллиметрового диапазона волн. Так, для клинотронов 8-мм диапазона волн толщина эмитирующей поверхности составляет 0,3...0,4 мм, а индукция фокусирующего магнитного поля составляет 0,34...0,36 Тл [15]. В ТГц-диапазоне частот данные параметры составляют 0,12...0,15 мм и 0,8...1,1 Тл соответственно [16, 18].

Важной особенностью процесса электронно-волнового взаимодействия в клинотроне является повышение выходной мощности и электронного КПД при работе в слабонеоднородном магнитном фокусирующем поле [15, 23]. Данный эффект достигается в результате снижения стартовых токов за счет увеличения длины пролета электронов в ВЧ-поле, а также за счет увеличения количества электронов, участ-

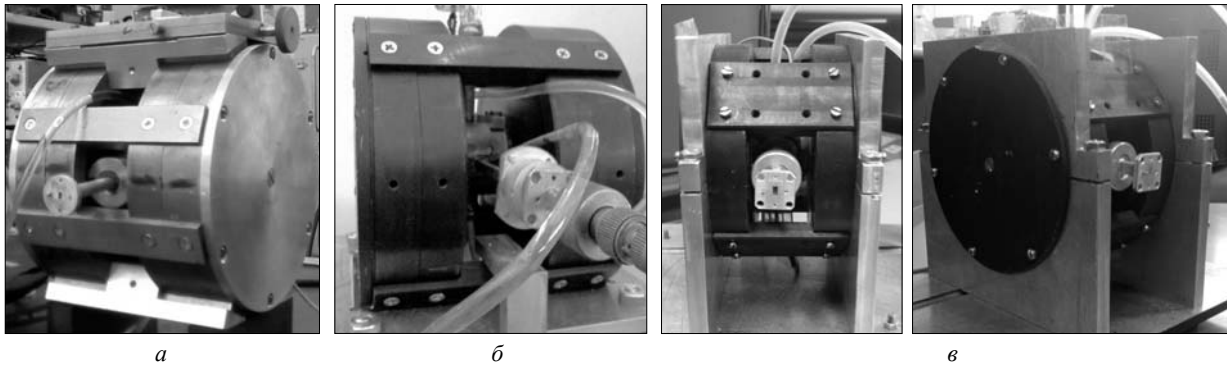


Рис. 1. Клинотроны, пакетированные в МФС с индукцией поля 0,88...1,1 Тл, для работы в диапазонах частот: а – 280...320 ГГц; б – 350...410 ГГц; в – 300...350 ГГц

вующих во взаимодействии [15, 20, 24]. В работах [20, 25] описано моделирование движения заряженных частиц в системе клинотрона путем интегрирования уравнений движения в заданном магнитном поле. Полученные результаты были использованы для определения оптимального распределения магнитного поля в пространстве взаимодействия [20]. По результатам исследований были созданы магнитные фокусирующие системы (МФС) на основе сплава неодима с сегментами в виде кольцевых секторов, намагниченных в радиальном направлении, обеспечивающие необходимый профиль магнитного поля для эффективной работы клинотронов в ТГц-диапазоне частот. Расчет фокусирующих систем [20, 26] осуществлялся как при моделировании уравнений магнитостатики [27], так и при использовании пакета программ *SuperFish* [28]. Разработанные МФС были успешно применены при создании пакетированных клинотронов в диапазоне частот 280...410 ГГц [18, 20]. На рис. 1 представлены фотографии разработанных клинотронов ТГц-диапазона.

Значительное влияние на выходные характеристики клинотрона оказывает методы изготовления ЗС [15]. Дело в том, что чистота поверхности ЗС определяет величину омических ВЧ-потерь поверхностной волны, распространяющейся вдоль системы. Кроме того, различные структурные дефекты приводят к возникновению дифракционных потерь рабочей моды, связанных с перекачкой энергии в высшие типы колебаний электродинамической системы.

В настоящее время чаще всего применяются следующие технологии изготовления замедля-

ющих систем [6]: обработка высокоскоростными малоразмерными фрезами (*nano-CNC-Milling*), электроэрозионная обработка (*EDM*), разновидности фотолитографии и глубокого ионного травления (*LIGA* и *DRIE*). Из-за особенности последних двух технологий, заключающейся в осаждении примесей из раствора электролита с последующей связью с медной поверхностью формируемой ЗС, их применение в клинотронах может встретить технологические трудности, связанные с очисткой ЗС. В противном случае осаждение электронного потока на ЗС будет способствовать вырыванию ионов примесей из металла и приводить к ионной бомбардировке катода, снижающей его эмиссионные свойства. Исследование параметров ЗС, изготовленных с применением технологии *nano-CNC-Milling*, представляет значительный интерес, однако в силу стоимости технологии является невозможным в данный момент. В работе [29] методом оптической микроскопии были проведены исследования шероховатости поверхностей ЗС, изготовленных по технологии *EDM*. Электропроводность материала пересчитывалась согласно модели Хаммерштеда [30] и учитывалась в дисперсионном анализе при расчете затухания рабочей волны на периоде ЗС [31]. В частности, было установлено, что возрастание омических ВЧ-потерь в клинотронах частотных диапазонов выше 140 ГГц обусловлено именно существенным перепадом профиля поверхности ЗС, превышающим глубину скин-слоя. Таким образом, определение действительных величин ВЧ-потерь и их учет в моделировании являются одной из важных проблем разработки приборов в ТГц-диапазоне.

Достоверное моделирование процесса электронно-волнового взаимодействия, происходящего в ЭВП, является сложной задачей, требующей рассмотрения множества физических эффектов. Очевидно, что при постановке задачи принимается целый ряд упрощений, которые могут включать: неточности, допущенные при изготовлении и сборке узлов прибора; реальные значения проводимости, теплопроводности, диэлектрической проницаемости и величины ВЧ-потерь материалов, используемых в конструкции, и т. п. Тем не менее, численные эксперименты необходимы для определения рабочих характеристик и последующей оптимизации параметров прибора.

В настоящее время моделирование параметров ЭВП производится путем решения системы самосогласованных уравнений Максвелла и уравнений движения. Решение данной задачи методом частиц в ячейках реализовано во множестве коммерческих программных пакетах [32, 33]. Однако такая реализация требует значительных вычислительных ресурсов.

В работах [34–39] развиты одномерные и двумерные модели приборов О-типа, учитывающие конечную величину магнитного фокусирующего поля, ВЧ-потери, коэффициент и фазу отражения рабочей волны от концов ЗС. Эти модели основаны на решении нелинейных нестационарных уравнений возбуждения электродинамических систем токами с использованием метода крупных частиц. Несмотря на то, что в таких приборах взаимодействие пучка осуществляется с полем поверхностной волны, рабочие параметры (частота, мощность и КПД) в значительной степени зависят от конструкции электродинамической системы, в которой размещается ЗС.

В миллиметровом диапазоне волн резонансное возбуждение электродинамической системы клинотрона осуществляется из-за отражений поверхностной волны от концов ЗС [40]. В результате электродинамическая система, представляющая собой волновод П-образного сечения с гребенчатой ЗС, становится резонатором поверхностной волны [15]. Сечение такого волновода одинаково для клинотронов всех диапазонов [15] и соответствует $7,2 \times 1,8$ мм. Ширина выступа в волноводе и, соответственно, ширина гребенки могут составлять 2,5 или

3,5 мм, в зависимости от диапазона частот. Расстояние между плоскостью ЗС и экраном составляет около 0,8 мм. Даже в двумерном приближении данные параметры обеспечивают одномодовый режим резонатора на частотах менее 187 ГГц. При рассмотрении трехмерной системы граница существования одномодового режима снижается почти до 60 ГГц. Таким образом, упомянутые выше модели не пригодны для проведения расчетов многомодовых систем клинотронов в ТГц-диапазоне [41].

Для уточнения выходных данных, получаемых в моделях клинотронов, в работе [42] было предложено использовать статистическую обработку эксплуатационных параметров экспериментальных клинотронов. Численный анализ позволил уточнить значение сдвига фаз колебаний на период системы, соответствующий максимальному КПД приборов в 2-мм диапазоне длин волн. Также в модели клинотрона были установлены пусковые и частотные характеристики. Полученные данные позволили создать клинотрон с рабочим диапазоном частот 115...135 ГГц и максимумом выходной мощности на заданной частоте, равной 130 ГГц [43].

В клинотроне значительное влияние на отражение и преобразование волн на концах ЗС [44] оказывают неоднородности в виде сложных волноводных тройников, образованные плечами пространства взаимодействия, вывода энергии и канала ввода электронного потока – с одной стороны, а также пространства взаимодействия и канала волновода с подстроечным короткозамкнутым поршнем – с другой стороны [15, 45]. В этой связи в работах [46, 47] было предложено комбинированное решение задачи рассеяния волн на неоднородностях электродинамической системы клинотрона и задачи возбуждения колебаний ЭП. Учет отражений поверхностной волны, взаимодействующей с электронным потоком, а также ее преобразование в высшие объемные моды и наоборот, позволил существенно повысить точность расчетов частотных характеристик генератора. Результаты моделирования, полученные для клинотронов в диапазоне частот 300...400 ГГц, показали хорошее соответствие с результатами экспериментальных исследований [21, 48].

В разработанной модели клинотрона был также произведен учет ВЧ омических потерь,

вызванных как шероховатостью поверхности ЗС, так и нагревом ЗС за счет осаждения ЭП на ее поверхность. Моделирование температурной нагрузки осуществлялось при рассмотрении трехмерных и двумерных уравнений теплопроводности с учетом внутренних тепловых источников и граничных условий первого и третьего рода [29, 48]. На частотах 136 и 301 ГГц было показано [29], что учет ВЧ-потерь даже в линейной теории ЛОВ показывает хорошее количественное соответствие между значениями моделируемой выходной мощности и КПД и экспериментальными значениями для клинотронов, работающих в режиме пусковых токов.

При создании клинотронов в ТГц-диапазоне частот важной задачей также является снижение влияния омических ВЧ-потерь на процесс электронно-волнового взаимодействия. С этой целью нами было предложено использование многоступенчатых ЗС в резонаторе клинотрона [19, 20]. Ранее такие системы использовались для вывода электромагнитной энергии из пространства взаимодействия [49, 50].

В работах [20, 51] был экспериментально продемонстрирован уровень выходной мощности более 2 Вт в режиме возбуждения поверхностных колебаний в клинотроне с трехступенчатой ЗС. Полный рабочий диапазон прибора составил 80...108 ГГц. Для работы на частоте 130 ГГц и вблизи оптимального сдвига фаз колебаний в статье [52] была предложена схема клинотрона с четырехступенчатой ЗС. Данная ЗС была оптимизирована для работы клинотрона на второй составляющей второй полосы пропускания с эффективным обменом энергией между пучком и ВЧ-полем при отношении глубины большого резонатора к малому, равному 1,1. Отстройка от режимов конкуренции колебаний осуществлялась путем изменения высоты положения экрана над ЗС. Рабочий диапазон частот генератора составил 122...132 ГГц.

Для снижения влияния омических ВЧ-потерь нами также рассматривается возможность уменьшения длины ЗС клинотронов в диапазоне частот более 300 ГГц. Используя изложенные выше методы моделирования, в диапазоне частот 320...360 ГГц авторы разработали клинотрон, длина ЗС которого укорочена на 30 % по сравнению с аналогичными приборами в данном диапазоне. Уменьшение длины



Диод с барьером Шоттки

Рис. 2. Схема детектирования электромагнитного излучения клинотрона

системы позволило уменьшить габариты прибора и зазор магнитного поля (с 32 до 27 мм). Экспериментальные исследования такого прибора установили возбуждение колебаний при токе пучка 100 мА и ускоряющем напряжении 4,5...5,8 кВ.

2. Экспериментальное исследование клинотронов непрерывного действия ТГц-диапазона частот. В клинотронах применяется ленточный электронный пучок, формируемый диодной электронной пушкой с импрегнированным или *L*-катодом. Электронная пушка рассчитана для работы в диапазоне ускоряющих напряжений до 5...6 кВ. Работа катода осуществляется в режиме температурного ограничения эмиссии, при этом рабочая плотность тока ЭП обычно составляет порядка 20...50 А/см².

Фокусировка ЭП в пакетированных клинотронах диапазона частот от 100 до 400 ГГц осуществляется в магнитном поле с индукцией 0,45...1,0 Тл. При этом зазор магнитной системы составляет 32 мм, а масса пакетированного изделия варьируется от 2 до 10 кг. Исследования полей рассеяния разработанных МФС показывают затухание магнитного поля до 1×10^{-3} ... 2×10^{-3} Тл по оси системы на расстоянии 250 мм от края полюса, что является достаточным для применения пакетированного клинотрона совместно с сверхпроводящими магнитами, используемыми для динамической поляризации ядер в спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ДПЯ-ЯМР).

Детектирование генерируемого электромагнитного излучения осуществляется в импульсном режиме питания клинотрона ускоряющим напряжением с длительностью импульсов 10 мс и частотой повторения 50 Гц. В качестве детектора используются диоды с барьером Шоттки типа *QuinStar QEA*. Схема детектирования приведена на рис. 2. На экране осциллографа регистрируется временная развертка сигнала с СВЧ-детектора и делителя

высоковольтного напряжения, что позволяет устанавливать значения напряжения для каждой зоны генерации.

На рис. 3 приведен пример изменения амплитуды выходного сигнала в зависимости от тока ЭП, полученный для пакетированного клинотрона, работающего в диапазоне частот 280...310 ГГц.

Для измерения частоты генерации в клинотронах используются следующие методы: прямой метод измерения длины волны с использованием квазиоптического резонатора типа Фабри–Перро; пересчет длины волны излучения по резонансной характеристике камерного волномера, работающего на моде круглого резонатора TE_{111} ; измерение частоты с помощью спектроанализатора. Точность прямого метода, в зависимости от добротности измерительной линии, составляет порядка 1 0000...100 мд. В тоже время использование калиброванного камерного волномера совместно с техникой цифровой градуировки позволяет достигать точности порядка 1000...100 мд.

Для измерения частоты в разрыв тракта между клинотроном и детектором помещается измерительное устройство (волномер). Согласование выходного волновода клинотрона с измерительным трактом может осуществляться как при помощи волноводных переходов, так и при помощи рупоров прямоугольного сечения. На рис. 4 представлена схема измерения частоты в случае использования спектроанализатора. Данные измерения были проведены совместно с *Far-Infrared Research Center of Fukui University* (Япония) в рамках выполнения партнерского проекта.

Смещение сигнала клинотрона, работающего на центральной частоте 300 ГГц, осуществлялось вместе с сигналом задающего генератора *Agilent N5183A* на смесительном диоде *VDI WR-2.8 EHM*. Диод осуществляет смещение на четных гармониках сигнала задающего генератора с выделением промежуточной частоты, которая регистрировалась спектроанализатором *Anritsu MS710C*. При детектировании излучения клинотрона использовался рупор прямоугольного сечения, осуществляющего плавный переход с сечения $3,6 \times 1,8 \text{ мм}^2$ на $26 \times 21 \text{ мм}^2$ на длине 50 мм. Техника СВЧ, использованная для детектирования излучения

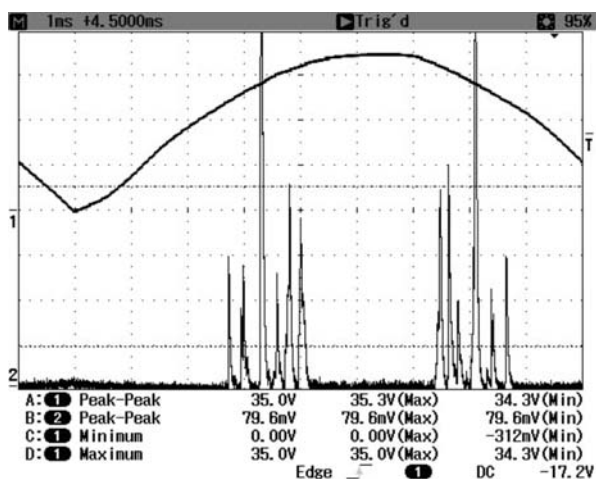
и проведения частотных измерений, представлена на рис. 5.

Измерение мощности генерируемого излучения осуществлялось с помощью болометра, включенного по мостовой схеме. Также для измерений использовались измеритель мощности типа *AV2436* и спектроанализатор *AV4051H* совместно со смесительным диодом.

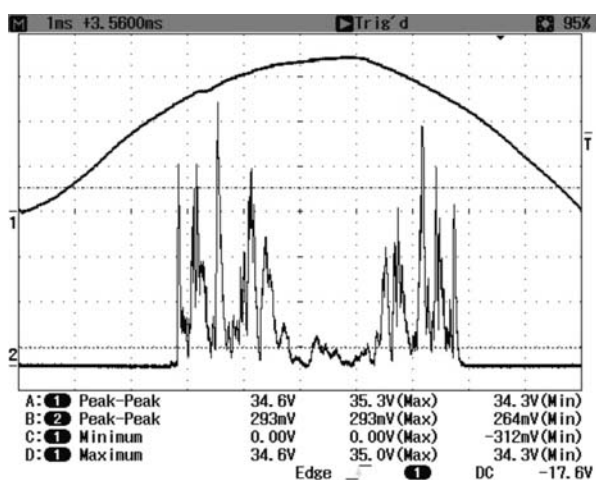
На рис. 6 приведены характерные зависимости выходной мощности от частоты генерации для пакетированных клинотронов, работающих в диапазоне частот от 120 до 410 ГГц. Рабочие величины тока электронного пучка в клинотронах составляют 80...150 мА. Стартовые режимы достигаются при токе пучка до 30 мА – на частотах до 150 ГГц, до 90 мА – в диапазоне частот до 410 ГГц. Диапазоны ускоряющего напряжения составляют 2...4 кВ и 3,5...5,5 кВ соответственно.

Приведенные на рис. 6 зависимости демонстрируют резонансный характер как в низкочастотной области ТГц-диапазона, так и на частотах близких к 400 ГГц, где значения омических ВЧ-потерь достаточно велики [21, 29]. Результаты некоторых исследований [46, 47] позволяют утверждать, что данные резонансы вызваны высшими типами волн, распространяющимися в сверхразмерном резонаторе клинотрона, а также частотными характеристиками узла вывода электромагнитной энергии. Данные характеристики определяют условия трансформации поверхностной и высших волн пространства взаимодействия в волны волноводного вывода энергии.

Проведенные экспериментальные исследования [43] показали, что зависимость выходной мощности от тока ЭП носит квадратичный характер в клинотронах для фиксированной частоты генерации. Это объясняется большей эффективностью электронно-волнового взаимодействия при проявлении клинотронного эффекта в режиме больших амплитуд. Так, например, для клинотрона с центральной частотой 130 ГГц выходная мощность составляет 95 мВт в стартовом режиме. С увеличением тока до 120 мА мощность растет до 750 мВт. Дальнейшее повышение тока ЭП до 160 мА соответствует выходной мощности около 1,5 Вт. Следовательно, для увеличения мощности генерации в диапазоне частот выше 200 ГГц при



а



б

Рис. 3. Осциллограммы излучения, демонстрирующие резонансный характер возбуждения колебаний в клинотроне с диапазоном частот 280...310 ГГц при ускоряющем напряжении 3,5 кВ и токах пучка: а – 80 мА; б – 112 мА

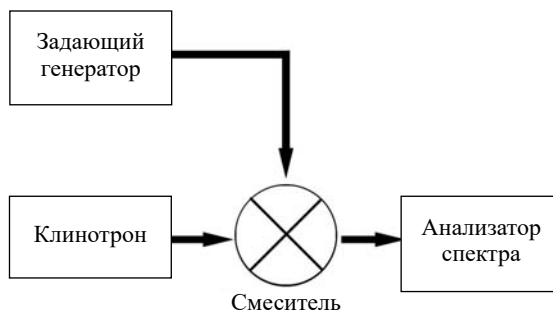
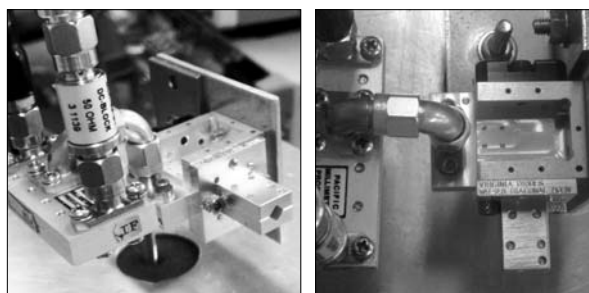


Рис. 4. Схема детектирования электромагнитного излучения клинотрона и измерения частоты генерации при помощи спектроанализатора



а



б

Рис. 5. Техника СВЧ для детектирования излучения и проведения частотных измерений в ТГц-диапазоне частот: а – узел со смесительным диодом VDI WR-2.8 EHM и приемным рупором; б – диод с барьером Шоттки QuinStar QEA с приемным рупором

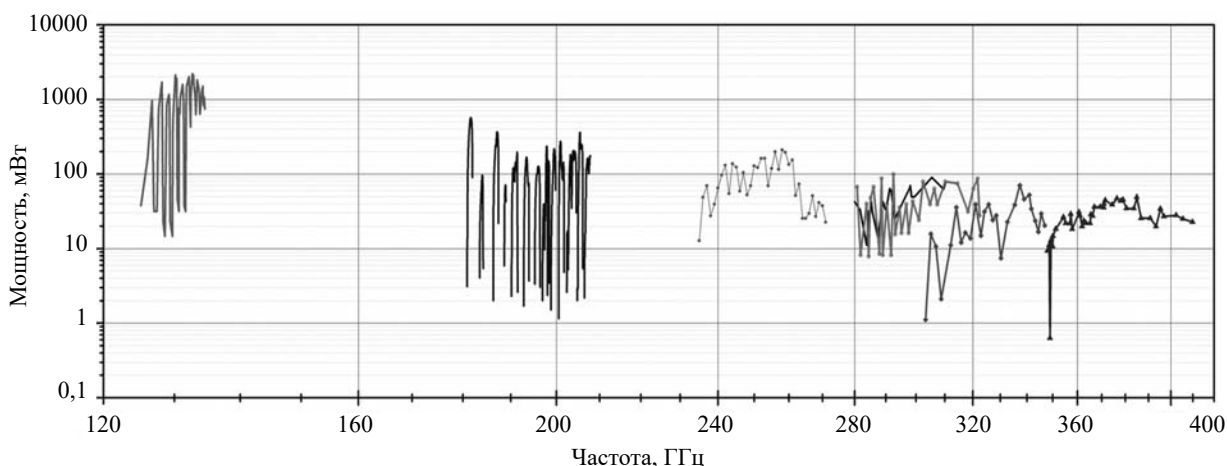


Рис. 6. Выходная мощность как функция частоты для клинотронов в диапазоне частот 100...410 ГГц, пакетированных в компактные МФС на постоянных магнитах

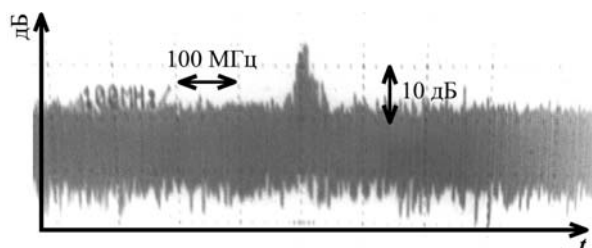


Рис. 7. Спектр генерации клинотрона на частоте 300 ГГц, при разрешении по частоте 300 кГц

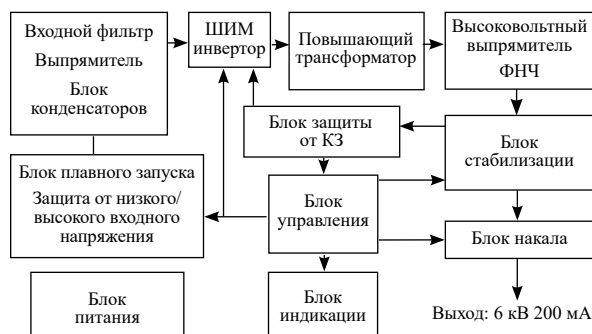


Рис. 8. Функциональная схема высоковольтного источника питания

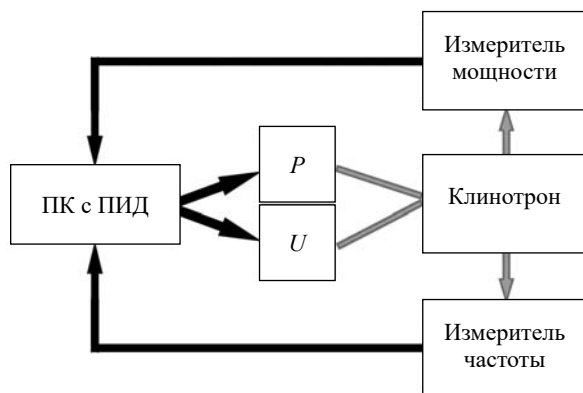


Рис. 9. Схема ПИД-стабилизации мощности и частоты излучения

неизменной конструкции существующих клинотронов необходимо переходить к рабочим токам более 200 мА. Однако достижение в клинотронах тока пучка свыше уже 180 мА является трудной задачей, связанной со значительным усилением эффекта бомбардировки катода ионами остаточных газов при воздействии ЭП на поверхность ЗС. Таким образом, актуальной задачей для клинотронов, как и для любого другого электронно-вакуумного прибора, является разработка эффективных катодов и применение современных технологий обезгаживания приборов. Также не маловажным является

разработка катодно-подогревательных узлов и электронных пушек для стабильной работы при ускоряющих напряжениях до 6 кВ.

Для применения ТГц-клинотронов в ДПЯ-ЯМР спектроскопии необходимо знать спектральные характеристики генерируемого электромагнитного излучения. Спектр генерации электромагнитного излучения клинотрона, работающего на центральной частоте 300 ГГц, представлен на рис. 7. Как видно на фотографии, ширина спектральной линии по уровню -3 дБ составляет менее 8 МГц. В диапазоне частот 280...320 ГГц ширина спектральной линии изменяется в пределах 7...10 МГц.

Крутизна электронной перестройки частоты в пределах одной зоны генерации данного клинотрона составила 19 МГц/В, при этом нестабильность источника питания ускоряющего напряжения составляла менее 100 мВ. Аналогичное расчетное значение, полученное с помощью модели клинотрона [47], составило 13 МГц/В.

Исследование частотных характеристик клинотрона с помощью спектроанализатора позволяет определить добротность установившегося вида колебаний как $Q = f/df$, где f – центральная частота, df – ширина зоны. Установлено, что ширина зоны генерации с центральной частотой 300 ГГц составляет 1,17 ГГц, что соответствует $Q = 256$.

3. Стабилизированные источники питания клинотронов в ТГц-диапазоне частот. В ДПЯ-ЯМР спектроскопии к источникам электромагнитного излучения, кроме спектральных характеристик, выдвигаются особые требования по частотной стабильности, а также стабильности падающей СВЧ-мощности.

При использовании клинотрона стабильность частоты генерируемого излучения в большей или меньшей мере (в зависимости от крутизны электронной перестройки частоты) зависит от стабильности напряжения высоковольтного источника питания. Стабильность генерируемой СВЧ-мощности также зависит от стабильности источника питания накала. Источник питания также должен обладать минимальными электромагнитными шумами в высоковольтной и накальных цепях, так как повышенный уровень шумов может значительно ухудшить спектральные характеристики генерируемого

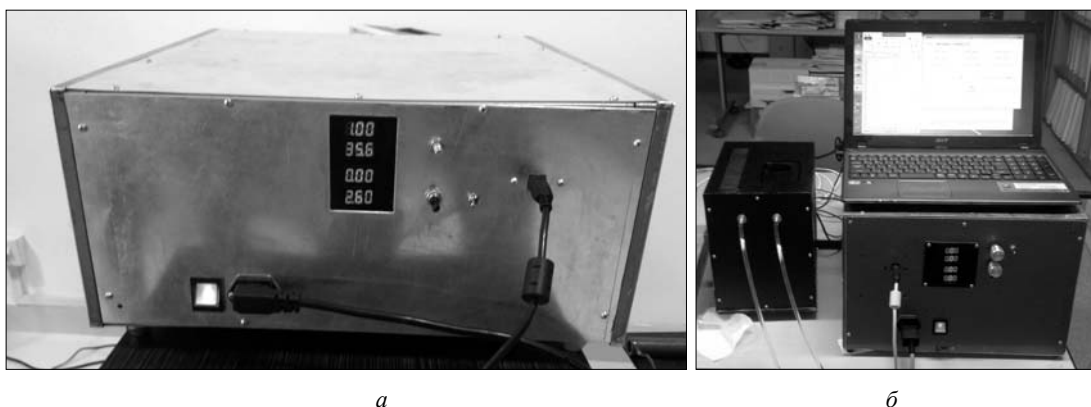


Рис. 10. Источник питания высоковольтных и накальных цепей клинотрона (а). Компактный комплекс для генерации электромагнитного излучения ТГц-диапазона, включающий источник питания и генераторный блок, управляемый через ПК (б).

излучения. Поскольку клинотрон обладает достаточно широкой электронной перестройкой частоты, то еще одним важным требованием, предъявляемым к высоковольтному источнику питания, является стабильность выходных характеристик в диапазоне выходных напряжений 1...6 кВ при различных нагрузках.

Для удовлетворения всех этих требований был разработан высоковольтный источник питания с повышенной стабильностью выходных характеристик. Функциональная схема источника питания показана на рис. 8.

Преобразование сетевого напряжения в высоковольтное происходит с помощью инвертора с широтно-импульсной модуляцией, собранного по схеме «полный мост», высоковольтного трансформатора и двухполупериодного выпрямителя со сложением напряжения. Уменьшение размеров и веса источника питания стало возможным благодаря работе на частоте 30 кГц, что позволило значительно уменьшить габариты повышающего трансформатора. Далее для снижения уровня высокочастотных шумов расположены LC-фильтр и блок стабилизации на проходном MOSFET транзисторе. Блок стабилизации позволяет уменьшить пульсации высоковольтного напряжения до 50...100 мВ во всем диапазоне нагрузок 10...200 мА и ускоряющих напряжений 500...6000 В. Для защиты клинотрона от высоковольтных пробоев в источнике питания реализован дополнительный контур защиты от короткого замыкания (КЗ). Данный контур, помимо защиты внутренних цепей источника питания, разряжает на внутреннюю нагрузку

энергию, запасенную в выходных конденсаторах, тем самым максимально уменьшая энергию высоковольтного пробоя.

Для питания цепей подогрева эмиттера клинотрона разработан источник питания накала с повышенным уровнем стабильности и низким уровнем шума. Источник питания накала защищен от перенапряжения и КЗ, а также имеет запрограммированный алгоритм включения и выключения накала, что позволяет максимально продлить срок службы электронной пушки.

Все цепи источника питания ТГц-комплекса имеют дополнительную защиту от электромагнитных всплесков.

Стабильность частоты и выходной мощности генерируемого излучения, помимо характеристик источника питания, зависит еще от многих факторов, таких как температура окружающей среды и охлаждающей жидкости, согласование клинотрона с внешней нагрузкой, изменение параметров нагрузки в процессе эксперимента и т. д. В связи с этим необходима возможность дополнительной корректировки высоковольтного напряжения и напряжения накала в источнике питания. Для осуществления такой корректировки в течение длительного времени необходим дополнительный контроль параметров клинотрона и возможность управления источником питания от ПК.

Для связи с ПК источник питания имеет микропроцессор, который через протокол общения управляет выходными параметрами источника питания.

Стабилизация частоты и мощности выходного излучения реализована с использованием

ПИД-регулирующего ускоряющего напряжения и напряжения накала, как было показано в работах [53, 54]. Схема для ПИД-стабилизации показана на рис. 9.

В данной схеме сигнал с электронного частотомера и измерителя мощности поступает в ПК, где сравнивается с заданными значениями. Далее разница между измеренными и заданными значениями подставляется в уравнение $e(t) = I_0 - I_b(t)$ для определения вольт-добавки к ускоряющему напряжению для стабилизации частоты и добавки к напряжению накала для стабилизации мощности.

$$I_{\Delta} = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

где $e(t)$ – разница между измеренным и заданным значением; K_p , K_i , K_d – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты соответственно; I_{Δ} – результирующая добавка для стабилизируемой величины.

Полученная поправка передается в высоковольтный источник питания, что приводит к корректировке выходных напряжений источника.

Разработанный высоковольтный источник питания и ТГц-комплекс изображены на рис. 10. В этом источнике возможно управление в ручном режиме и с ПК. Благодаря дополнительному экранированию сильношумящих цепей и наличию дополнительной фильтрации входного и выходного напряжений, источник питания не создает электромагнитных помех, которые могут помешать работе высокоточного измерительного оборудования и других приборов. Масса источника питания для ТГц-комплекса не превышает 15 кг, габаритные размеры составляют $200 \times 400 \times 400$ мм.

Выводы. Теоретические и экспериментальные исследования процессов транспортировки интенсивных ЭП в слабо неоднородных магнитных фокусирующих полях, электронно-волнового взаимодействия ЭП с ВЧ-полями ЗС, распространения поверхностных и высших волн, взаимной трансформации на неоднородностях электродинамической системы, а также исследования омических ВЧ-потерь, вызванных шероховатостью поверхности ЗС и тепловым воздействием со стороны падающего ЭП, позво-

лили разработать пакетированные клинотроны в диапазоне частот до 410 ГГц.

Для расчета частотных характеристик в ТГц-диапазоне частот модель электронно-волнового взаимодействия клинотрона была дополнена учетом взаимного преобразования и отражений на неоднородностях электродинамической системы распространяющихся поверхностной и высших волн.

Для уточнения полученных результатов применены методы статистического анализа экспериментальных параметров известных клинотронов. Были установлены значения оптимального сдвига фаз колебаний на период ЗС, параметров пространственного заряда, длины и усиления по Пирсу в зависимости от частоты.

Экспериментально получена генерация колебаний в пакетированных клинотронах диапазона частот 120...410 ГГц. Продемонстрированы результаты исследования спектральных характеристик клинотронов на частотах до 410 ГГц. Показано отсутствие паразитных колебаний в соответствующих рабочих диапазонах. Также продемонстрирована кратковременная стабильность частоты генерируемого излучения величиной 8 МГц на частоте генерации клинотрона 300 ГГц и определена нагруженная добротность «горячей» электродинамической системы ТГц-клинотрона, которая составляет величину 256. Определены пути дальнейшей разработки клинотронов ТГц-диапазона частот. Рассмотрены вопросы создания эффективных катодов, обеспечивающих стабильную работу электронно-оптической системы при ускоряющем напряжении до 6 кВ. Продемонстрированы недостатки применяемой в настоящее время EDM технологии изготовления ЗС клинотронов, заключающиеся в низкой чистоте поверхностей. В частности показано, что в диапазоне частот 150...500 ГГц при улучшении существующей величины чистоты поверхности до 10 раз величина ВЧ-потерь снижается лишь на 5...6 %. Рассмотрены методы снижения влияния омических ВЧ-потерь на процесс электронно-волнового взаимодействия в клинотронах ТГц-диапазона путем применения многоступенчатых ЗС, а также систем с малым параметром длины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Siegel P.H. THz technology: An overview. *Int. J. High Speed Electron. Syst.* 2003. Vol. 13, N 2. P. 351–394.
2. Romanenko S., Begley R., Harvey A.R., Hool L., Wallace V.P. The interaction between electromagnetic fields at megahertz, gigahertz and terahertz frequencies with cells, tissues and organisms: risks and potential. *J. R. Soc. Interface.* 2017. Vol. 14, N 137. P. 20170585.
3. Вертий А.А., Карнаухов И.М., Шестопалов В.П. *Поляризация атомных ядер миллиметровыми волнами.* Киев: Наук. думка, 1990. 232 с.
4. Idehara T., Kosuga K., Agusu L., Ikeda R., Ogawa I., Saito T., Matsuki Y., Ueda K., Fujiwara T. Continuously frequency tunable high power sub-THz radiation source – gyrotron FU CW VI for 600 MHz DNP–NMR spectroscopy. *J. Infrared Millimeter Waves.* 2010. Vol. 31, N 7. P. 775–790.
5. Yamazaki T., Miyazaki A., Suehara T., Namba T., Asai S., Kobayashi T., Saito H., Ogawa I., Idehara T., Sabchevski S. Direct observation of the hyperfine transition of ground-state positronium. *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 108, N 25. P. 253401(5 p.).
6. Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.-S., Park J., Temkin R.J. Vacuum electronic high power terahertz sources. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011. Vol. 1, N 1. P. 54–75.
7. Gorshunov B., Volkov A., Spektor I., Prokhorov A., Mukhin A., Dressel M., Uchida S., Loidl A. Terahertz BWO-spectroscopy. *J. Infrared Millimeter Terahz Waves.* 2005. Vol. 26, N. 9. P. 1217–1240.
8. Razavi B. A 300-GHz fundamental oscillator in 65-nm CMOS technology. *IEEE J. Solid-State Circuits.* 2011. Vol. 46, N 4. P. 894–903.
9. Terasense Group, Inc. Sub-Terahertz Sources. *San Jose CA, USA* 2018. URL: <http://terasense.com/wp-content/uploads/2018/02/Terahertz-Source-Datasheet.pdf>
10. Virginia Diodes, Inc. VDI-733-Broadband-tripler-product-manual. *Charlottesville VA, USA* 2018. URL: http://www.datasheetarchive.com/whats_new/488be148cc0495e067ed3381eb6f74f0.html
11. Гершензон Е.М., Голант М.Б., Негирев А.А., Савельев В.С. *Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.* Под ред. Н.Д. Девяткова. Москва: Радио и связь, 1985. 136 с.
12. Bratman V.L., Dumesh B.S., Fedotov A.E., Makhlov P.B., Movshevich B.Z., Rusin F.S. Terahertz orotrons and oromultipliers. *IEEE Trans. on Plasma Science.* 2010. Vol. 38, N 6. P. 1466–1471. DOI: 10.1109/TPS.2010.2041367.
13. Mizuno K., Ono S. and Shibata Y. Two different mode interaction in electron tube with a Fabry-Perot resonator – The ledatron. *IEEE Trans. Electron Devices.* 1973. Vol. 20, N 8. P. 749–752.
14. Вертий А.А., Ермак Г.П., Скрынник Б.К., Хлопов Г.И., Цвык А.И. *Генераторы дифракционного излучения.* Под ред. В.П. Шестопалова. Киев: Наук. думка, 1991. 320 с.
15. Левин Г.Я., Бородкин А.И., Кириченко А.Я., Чурилова С.А. *Клинотрон.* Под ред. А.Я. Усикова. Киев: Наук. думка, 1992. 157 с.
16. Лысенко Е.Е., Паньков С.В., Пишко О.Ф., Чумак В.Г., Чурилова С.А. Разработка клинотронов непрерывного действия для диапазона 400...500 ГГц. *Электромагнитные волны и электронные системы.* 2010. Т. 15, № 11. С. 63–71.
17. Ефимов Б.П. Многоволновый резонансный клинотрон миллиметрового диапазона. *Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины.* Харьков, 2007. Т. 12, спецвып. С. 71–80.
18. Ponomarenko S.S., Kishko S.A., Khutoryan E.M., Kuleshov A.N., Zavertanniy V.V., Lopatin I.V., Yefimov B.P. 400 GHz continuous-wave clinotron oscillator. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2013. Vol. 41, N 1. P. 82–86.
19. Ponomarenko S.S., Kishko S.A., Khutoryan E.M., Kuleshov A.N., Yefimov B.P. Development of 94 GHz BWO –klynotron with 3-stage grating. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2014. Vol. 73, N 3. P. 271–281.
20. Пономаренко С.С. Ефективність взаємодії електронних потоків з об'ємно-поверхневими полями в генераторах О-типу: дис. канд. фіз.-мат. наук: Ін-т радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України. Харків, 2014. 200 с.
21. Kovshov Y., Ponomarenko S., Kishko S., Vlasenko S., Lihachev A., Lukash A., Danik A., Khutoryan E.M., Kuleshov A.N. 0.1–0.4 THz clinotron table-top modules for spectroscopy applications. *IEEE Int. Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF 2017)* (October 2017, Lviv): conf. proc. Lviv, 2017. DOI:10.1109/ysf.2017.8126665.
22. Kuleshov A., Ponomarenko S., Kishko S., Zavertanniy V., Khutoryan E., Yefimov B. Sub-THz CW clinotron oscillators with increased output power. *IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2014)* (April 2014, Monterey CA): conf. proc. Monterey CA, 2014. DOI:10.1109/ivec.2014.6857496.
23. Бородкин А.И., Кириченко А.Я., Левин Г.Я. Об улучшении условий взаимодействия электронного потока с полем поверхностной волны в клинотроне при работе в слабо неоднородном магнитном поле. *Труды Ин-та радиофизики и электрон. АН УССР.* Харьков: ИРЭ АН УССР, 1961. Т. 9. С. 273–277.
24. Кириченко А.Я., Ефимов Б.П. К вопросу о работе ЛОВ О-типа с нежесткофокусированным электронным потоком в неоднородном магнитном поле. *Труды Ин-та радиофизики и электрон. АН УССР.* Харьков: ИРЭ АН УССР, 1967. Т. 15. С. 130–140.
25. Пономаренко С.С., Кишко С.А., Кулешов А.Н., Хutoryan Э.М., Завертанный В.В., Кириченко Л.А., Тищенко А.С., Ефимов Б.П. Транспортировка нерелятивистских электронных потоков в слабонеоднородных магнитных фокусирующих полях клинотронов субмиллиметрового диапазона. *Вестник ХНУ имени В.Н. Каразина. Сер. Радиофизика и электроника.* 2012. Т. 21, № 1038. С. 77–82.
26. Завертанный В.В., Кишко С.А., Пономаренко С.С., Ефимов Б.П., Забродский А.Ф., Кириченко Л.А., Кудинова Т.В., Кулешов А.Н. Магнитная фокусирующая система интенсивных электронных пучков для клинотронов субмиллиметрового диапазона. *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2012. Т. 20, №. 5. С. 112–120. DOI: 10.18500/0869-6632-2012-20-5-112-120.

27. Molokovsky S.I., Sushkov A.D. *Methods of fields calculations. Intense Electron and Ion Beams*. Berlin, Germany: Springer, 2005. P. 27–45.
28. Poisson Superfish is a collection of programs for calculating static magnetic and electric fields and radio-frequency electromagnetic fields in either 2-D Cartesian coordinates or axially symmetric cylindrical coordinates. 2018. URL: http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml
29. Ковшов Ю.С., Пономаренко С.С., Кишко С.А., Лихачев А.А., Власенко С.А., Завертанный В.В., Хуторян Э.М., Кулешов А.Н. Высокочастотные омические потери в клинотронах непрерывного действия терагерцевого диапазона частот. *Радиофизика и электроника*. 2017. Т. 8(22), № 1. С. 68–76.
30. Kirley M.P., Booske J.H. The physics of conductivity at terahertz frequencies. *IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2015)* (April 2015, Beijing): conf. proc. Beijing, 2015. DOI: 10.1109/IVEC.2015.7223746.
31. Лебедев И.В. *Техника и приборы СВЧ*. Москва: Высшая школа, 1972. Т. 1. 405 с.
32. CST Computer Simulation Technology. CST Studio Suite. 2018. URL: <https://www.cst.com/products/csts2>
33. Woods A.J., Ludeking L.D., Cavey L.W., Rhoades D.L. MAGIC Build 3D graphical input builder. *19th IEEE Pulsed Power Conf. (PPC 2013)* (March 2013, San Francisco CA): conf. proc. San Francisco CA, 2013. DOI:10.1109/ppc.2013.662760.
34. Вайнштейн Л.А. Солнцев В.А. *Лекции по сверхвысокочастотной электронике*. Москва: Сов. радио, 1973. 593 с.
35. Levush B., Antonsen T.M., Bromborsky A., Lou W.R., Carmel Y. Theory of relativistic backward wave oscillator with end reflections. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1992. Vol. 20, N 3. P. 263–280.
36. Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н. Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1978. Т. 21, № 7. С. 1052–1052.
37. Khutoryan E., Sattorov M., Lukin, K.A., Kwon O.-J., Min S.-H., Bhattacharya R., Baek I.-K., Seontae K., Yi M., So J., Park G.-S. Theory of multimode resonant backward-wave oscillator with an inclined electron beam. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2015. Vol. 62, N 5. P. 1628–1634.
38. Амиров Р.Ш., Безручко Б.П., Булгакова Л.В., Захарченко Ю.Ф., Зборовский А.В., Исаев В.А., Кузнецов С.П., Синицын Н.И., Трубецков Д.И. (ред.), Шараевский Ю.П., Шевчик В.Н. (ред.). *Электроника ламп с обратной волной*. Саратов: Саратовский Университет, 1975. 195 с.
39. Евдокименко Ю.И., Лукин К.А., Шестопалов В.П. К двумерной нелинейной нестационарной теории генератора дифракционного излучения. *Электронная техника. Электроника СВЧ*. 1981. Т. 10, № 334. С. 35–40.
40. Ефимов Б.П., Кириченко А.Я., Бужинский А.П. Экспериментальное исследование влияния отражений на частотные характеристики ЛОВ миллиметрового диапазона. Труды Ин-та радиофизики и электрон. АН УССР. Харьков: ИРЭ АН УССР, 1967. Т. 15. С. 141–157.
41. Ефимов Б.П., Лукин К.А., Ракитянский В.А., Шестопалов В.П. Стохастическое взаимодействие мод в электронно-волновой автоколебательной системе с двумя каналами обртной связи. *Письма в Журн. техн. физики*. 1989. Т. 15, № 18. С. 9–12.
42. Ковшов Ю.С., Кишко С.А., Пономаренко С.С., Власенко С.А. Новикова-Коротун Ю.С., Завертанный В.В., Кулешов А.Н. Моделирование и экспериментальное исследование характеристик клинотронов непрерывного действия в диапазоне частот 125...135 ГГц. *Радиофизика и электроника*. 2016. Т. 7(21), № 2. С. 45–52.
43. Ponomarenko S.S., Kovshov Y.S., Kishko S.A., Novikova-Korotun Y.S., Khutoryan E.M., Kuleshov A.N. Development of compact CW clinotrons for DNP-NMR spectroscopy. *9th Int. Kharkiv Symp. Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW 2016)* (June 2016, Kharkiv): conf. proc. Kharkiv, 2016.
44. Nusinovich G.S., Bliokh Yu.P. Mode interaction in backward-wave oscillators with strong end reflections. *Phys. Plasmas*. 2000. Vol. 7, N 4. P. 1294–1301.
45. Пишко О.Ф., Чумак В.Г., Чурилова С.А. Электродинамические характеристики выходного устройства клинотрона. *Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины*. Харьков, 2007. Т. 12, спецвып. С. 130–133.
46. Kovshov Y.S., Ponomarenko S.S., Kishko S.A., Likhachev A., Danik A., Mospan L., Steshenko S., Khutoryan E.M., Kuleshov A.N. Demonstration of a mode transformation effect in 300-GHz CW clinotron. *17th Int. Conf. Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET 2018)* (June 2018, Kyiv): conf. proc. Kyiv, 2018. DOI: 10.1109/MMET.2018.8460346.
47. Kovshov Y.S., Ponomarenko S.S., Kishko S.A., Likhachev A., Danik A., Mospan L., Steshenko S., Khutoryan E.M., Kuleshov A.N. Effect of Mode Transformation in THz Clinotron. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*. 2018. Vol. 39, Iss. 11. P. 1055–1064. DOI: 10.1007/s10762-018-0534-y.
48. Kovshov Yu.S., Ponomarenko S.S., Kishko S.A., Khutoryan E.M., Kuleshov A.N. Numerical simulation and experimental study of Sub-THz and THz CW clinotron oscillators. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2018. Vol. 65, N. 6. P. 2177–2182.
49. Лысенко Е.Е., Пишко О.Ф., Чурилова С.А. Экспериментальное исследование клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии. *Радиофизика и радиоастрономия*. 1999. Т. 4, № 1. С. 13–20.
50. Бородкин А.И., Бузик Л.М., Лысенко Е.Е. *Исследование многоступенчатых замедляющих систем гребенчатого типа*. Харьков: Ин-т радиофизики и электроники АН УССР, 1980. 39 с. (Препринт АН УССР, Ин-т радиофизики и электроники; № 151).
51. Хуторян Э.М., Пономаренко С.С., Кишко С.А., Лукин К.А., Кулешов А.Н., Ефимов Б.П. Колебания в генераторе О-типа при возбуждении объемно-поверхностной моды резонатора с периодически неоднородной гребенкой. *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2013. Т. 21, № 2. С. 9–19.
52. Kovshov Yu.S., Khutoryan E.M., Likhachev A.S., Ponomarenko S.S., Kishko S.A., Lukin K.A., Zavertanniy V.V., Kudinava T.V., Vlasenko S.A., Kuleshov A.N., Idehara T. Excitation of hybrid space-surface waves in clinotrons with non-uniform grating. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*. 2018. Vol. 39, N 3. P. 236–249.

53. Idehara T., Kuleshov A.N., Ueda K., Khutoryan E.M. Power-stabilization of high frequency gyrotrons using a double PID feedback control for applications to high power THz spectroscopy. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*. 2014. Vol. 35, N 2. P. 159–168.
54. Ковшов Ю.С., Кишко С.А., Иванов А.И., Пономаренко С.С., Кулешов А.Н., Ефимов Б.П. Стабилизация частоты электромагнитных колебаний в ЛЮВ-генераторах субмиллиметрового диапазона. *Вестник ХНУ имени В.Н. Каразина. Сер. Радиофизика и электроника*. 2013. Т. 23, № 1094. С. 77–83.

Стаття надійшла 17.12.2018

REFERENCES

- Siegel, P.H., 2003. THz technology: An overview. *Int. J. High Speed Electron. Syst.*, **13**(2), pp. 351–394.
- Romanenko, S., Begley, R., Harvey, A.R., Hool, L., Wallace, V.P., 2017. The interaction between electromagnetic fields at megahertz, gigahertz and terahertz frequencies with cells, tissues and organisms: risks and potential. *J. R. Soc. Interface*, **14**(137), pp. 20170585.
- Vertiy, A.A., Karnaukhov, I.M., Shestoplov, V.P., 1990 *Polarization of atomic nuclei using millimeter waves*. Kiev: Naukova dumka Publ. (in Russian).
- Idehara, T., Kosuga, K., Agusu, L., Ikeda, R., Ogawa, I., Saito, T., Matsuki, Y., Ueda, K., Fujiwara, T., 2010. Continuously frequency tunable high power sub-THz radiation source – gyrotron FU CW VI for 600 MHz DNP–NMR spectroscopy. *J. Infrared Millimeter Waves*, **31**(7), pp. 775–790.
- Yamazaki, T., Miyazaki, A., Suehara, T., Namba, T., Asai, S., Kobayashi, T., Saito, H., Ogawa, I., Idehara, T., Sabchevski, S., 2012. Direct observation of the hyperfine transition of ground-state positronium. *Phys. Rev. Lett.*, **108**(25), pp. 253401(5 p.).
- Booske, J.H., Dobbs, R.J., Joye, C.D., Kory, C.L., Neil, G.R., Park, G.-S., Park, J., Temkin, R.J., 2011. Vacuum electronic high power terahertz sources. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **1**(1), pp. 54–75.
- Gorshunov, B., Volkov, A., Spektor, I., Prokhorov, A., Mukhin, A., Dressel, M., Uchida, S., Loidl, A., 2005. Terahertz BWO-spectroscopy. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, **26**(9), pp. 1217–1240.
- Razavi, B., 2011. A 300-GHz fundamental oscillator in 65-nm CMOS technology. *IEEE J. Solid-State Circuits*, **46**(4), pp. 894–903.
- TERASENSE GROUP, INC., 2018. Sub-Terahertz Sources. *San Jose CA, USA*. URL: <http://terasense.com/wp-content/uploads/2018/02/Terahertz-Source-Datasheet.pdf>
- VIRGINIA DIODES, INC., 2018. VDI-733-Broadband-tripler-product-manual. *Charlottesville VA, USA*. URL: http://www.datasheetarchive.com/whats_new/488be148cc0495e067ed3381eb6f74f0.html
- Gershenson, E.M., Golant, M.B., Negirev, A.A., Savel'ev, V.S., Devyatkov, N.D. ed., 1985. *Millimeter and submillimeter backward wave oscillators*. Moscow: Radio i svyaz' Publ. (in Russian).
- Bratman, V.L., Dumesh, B.S., Fedotov, A.E., Makhlov, P.B., Movshevich, B.Z., Rusin, F.S., 2010. Terahertz orotrons and oromultipliers. *IEEE Trans. on Plasma Science*. Vol. 38, N 6. pp. 1466–1471. DOI: 10.1109/TPS.2010.2041367
- Mizuno, K., Ono, S. and Shibata, Y., 1991. Two different mode interaction in electron tube with a Fabry-Perot resonator – The ledatron. *IEEE Trans. Electron Devices*, **20**(8), pp. 749–752.
- Vertiy, A.A., Ermak, G.P., Skrynnik, B.K., Khlopov, G.I., Tsyvyk, A.I., Shestopalov, V.P. ed., 1991. *Diffraction radiation oscillators*. Kiev: Naukova dumka Publ. (in Russian).
- Levin, G.Ya., Borodkin, A.I., Kirichenko, A.Ya., Churilova, S.A., Usikov, A.Ya. ed., 1992. *Clinotron*. Kiev: Naukova dumka Publ. (in Russian).
- Lysenko, E.E., Pan'kov, S.V., Pishko, O.F., Chumakov, V.G., Churilova, S.A., 2010. Development of CW clinotrons for the 400...500 GHz range. *Elektromagnitnye volny I elektronnye sistemy*, **15**(11), pp. 63–71 (in Russian).
- Yefimov, B.P., 2007. Multi-wave resonant clinotron for millimeter range. In: V.M. Yakovenko, ed. 2007. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **12**(spec. iss.), pp. 71–80 (in Russian).
- Ponomarenko, S.S., Kishko, S.A., Khutoryan, E.M., Kuleshov, A.N., Zavertanniy, V.V., Lopatin, I.V., Yefimov, B.P., 2013. 400 GHz continuous-wave clinotron oscillator. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **41**(1), pp. 82–86.
- Ponomarenko, S.S., Kishko, S.A., Khutoryan, E.M., Kuleshov, A.N., Yefimov, B.P., 2014. Development of 94 GHz BWO–klynotron with 3-stage grating. *Telecommunications and Radio Engineering*, **73**(3), pp. 271–281.
- Ponomarenko, S.S., 2014. *Interaction efficiency of the electron beam with the volume-surface fields in O-type oscillators*. PhD thesis ed., O.Ya. Usikov Institute for Radiphysics and Electronics, NASU (in Russian).
- Kovshov Y., Ponomarenko, S., Kishko, S., Vlasenko, S., Lihachev, A., Lukash, A., Danik, A., Khutoryan, E.M., Kuleshov, A.N., 2017. 0.1–0.4 THz clinotron table-top modules for spectroscopy applications. In: *IEEE Int. Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF 2017)*: conf. proc. Lviv, October. DOI:10.1109/ysf.2017.8126665.
- Kuleshov, A., Ponomarenko, S., Kishko, S., Zavertanniy, V., Khutoryan, E., Yefimov, B., 2014. Sub-THz CW clinotron oscillators with increased output power. In: *IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2014)*: conf. proc. Monterey CA, April. DOI:10.1109/ivec.2014.6857496.
- Borodkin, A.I., Kirichenko, A.Ya., Levin, G.Ya., 1961. Improving the conditions for the interaction of the electron beam with the surface wave field in the clinotron when operating in a weakly inhomogeneous magnetic field. In: A.Ya. Usikov, ed. 1961. *Trudy Instituta radiofiziki i elektroniki AN UkrSSR*, **9**, pp. 273–277 (in Russian).
- Kirichenko, A.Ya., Yefimov, B.P., 1967. On the question of the operation of an BWO O-type with a non-focused electron beam in a non-uniform magnetic field. In: A.Ya. Usikov, ed. 1967. *Trudy Instituta radiofiziki i elektroniki AN UkrSSR*, **15**, pp. 130–140 (in Russian).

25. Ponomarenko, S.S., Kishko, S.A., Kuleshov, A.N., Khutoryan, E.M., Zavertanniy, V.V., Kirichenko, L.A., Tishchenko, A.S., Yefimov, B.P., 2012. Transporting of the nonrelativistic electron beams in weak inhomogeneous magnetic focusing fields for submillimeter clinotrons. *Karazin HNU Vestnik. Ser. Radiofizika i elektronika*, **21**(1038), pp. 77–82 (in Russian).
26. Zavertanniy, V.V., Kishko, S.A., Ponomarenko, S.S., Yefimov, B.P., Zabdroskiy, A.F., Kirichenko, L.A., Kudina, T.V., Kuleshov, A.N., 2012. Magnetic focusing system for intense electron beams of submillimeter clinotrons. *Prikladnaya nelineynaya dinamika. Commun. Syst.*, **20**(5), pp. 112–120 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2012-20-5-112-120.
27. Molokovsky, S.I., Sushkov, A.D. 2005. *Methods of fields calculations. Intense Electron and Ion Beams*. Berlin, Germany: Springer.
28. 2018. Poisson Superfish is a collection of programs for calculating static magnetic and electric fields and radio-frequency electromagnetic fields in either 2-D Cartesian coordinates or axially symmetric cylindrical coordinates. URL: http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml
29. Kovshov, Yu.S., Ponomarenko, S.S., Kishko, S.A., Lihachev, A.A., Vlasenko, S.A., Zavertanniy, V.V., Khutoryan, E.M., Kuleshov, A.N., 2017. High frequency ohmic losses in terahertz frequency range CW clinotrons. *Radiofiz. elektron.*, **8**(22) (1), pp. 68–76 (in Russian).
30. Kirley, M.P., Booske, J.H., 2015. The physics of conductivity at terahertz frequencies. In: *IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2015)*: conf. proc. Beijing, April. DOI: 10.1109/IVEC.2015.7223746.
31. Lebedev, I.B., 1972. *Microwave equipment and devices*. Moscow: Vysshaya shkola Publ. Vol. 1 (in Russian).
32. CST Computer Simulation Technology. 2018. CST Studio Suite. URL: <https://www.cst.com/products/csts2>
33. Woods, A.J., Ludeking, L.D., Cavey, L.W., Rhoades, D.L., 2013. MAGIC Build 3D graphical input builder. In: *19th IEEE Pulsed Power Conf. (PPC 2013)*: conf. proc. San Francisco CA, March. DOI:10.1109/ppc.2013.662760.
34. Weinshtein, L.A., Solntsev, V.A., 1973. *Lectures on microwave electronics*. Moscow: Sovetskoe radio Publ. (in Russian).
35. Levush, B., Antonsen, T.M., Bromborsky, A., Lou, W.R., Carmel, Y., 1992. Theory of relativistic backward wave oscillator with end reflections. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **20**(3), pp. 263–280.
36. Ginsburg, N.S., Kuznetsov, S.P., Fedoseeva, T.N., 1978. Theory of transients in a relativistic BWO. *Radiofizika. Commun. Syst.*, **21**(7), pp. 1052–1052 (in Russian).
37. Khutoryan, E., Sattarov, M., Lukin, K.A., Kwon, O.-J., Min, S.-H., Bhattachary, A.R., Baek, I.-K., Seontae, K., Yi, M., So, J., Park, G.-S., 2015. Theory of multimode resonant backward-wave oscillator with an inclined electron beam. *IEEE Trans. Electron Devices*, **62**(5), pp. 1628–1634.
38. Amirov, R.Sh., Bezruchko, B.P., Bulgakova, L.V., Zakharchenko, Yu.F., Zborovskiy, A.V., Isaev, V.A., Kuznetsov, S.P., Sinitsyn, N.I., Trubetskov, D.I. (ed.), Sharaevskiy, Yu.P., Shevchik, V.N. (ed.), 1975. *Electronics backward wave oscillators*. Saratov: Saratov University Publ. (in Russian).
39. Yevdokimenko, Yu.I., Lukin, K.A., Shestopalov, V.P., 1981. On the two-dimensional nonlinear unsteady-state theory of diffraction-radiation oscillator. *Elektronnaya Tekhnika. Elektronika SVCH*, **10**(334), pp. 35–40 (in Russian).
40. Yefimov, B.P., Kirichenko, A.Ya., Buzhinsky, A.P., 1967. Experimental study of the influence of reflections on the frequency characteristics of BWO in millimeter range. In: A.Ya. Usikov, ed. 1967. *Trudy Instituta radiofiziki i elektroniki AN UkrSSR*, **15**, pp. 141–157 (in Russian).
41. Yefimov, B.P., Lukin, K.A., Rakitianskii, V.A., Shestopalov, V.P., 1989. Stochastic mode interaction in an electron-wave self-oscillating system with two feedback channels. *Pis'ma Zh. Tekh.Fiz.*, **15**(18), pp. 9–12 (in Russian).
42. Kovshov, Yu.S., Kishko, S.A., Ponomarenko, S.S., Vlasenko, S.A., Novikova-Korotun, Yu.S., Zavertanniy, V.V., Kuleshov, A.N., 2016. Simulation and experimental research on CW Klynotron in Frequency Range 125–135 GHz. *Radiofiz. elektron.*, **7**(21)(2), pp. 45–52 (in Russian).
43. Ponomarenko, S.S., Kovshov, Yu.S., Kishko, S.A., Novikova-Korotun, Yu.S., Khutoryan, E.M., Kuleshov, A.N., 2006. Development of compact CW clinotrons for DNP-NMR spectroscopy. In: *9th Int. Kharkiv Symp. Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW 2016)*: conf. proc. Kharkiv, June. DOI: 10.1109/msmw.2016.7538043.
44. Nusinovich, G.S., Bliokh, Yu.P., 2000. Mode interaction in backward-wave oscillators with strong end reflections. *Phys. Plasmas*, **7**(4), pp. 1294–1301.
45. Pishko, O.F., Chumak, V.G., Churilova, S.A., 2007. Electrodynamics characteristics of the output device of the clinotron. In: V.M. Yakovenko, ed. 2007. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine. **12**(spec. iss.). pp. 130–133 (in Russian).
46. Kovshov, Yu.S., Ponomarenko, S.S., Kishko, S.A., Likhachev, A., Danik, A., Mospan, L., Steshenko, S., Khutoryan, E.M., Kuleshov, A.N., 2018. Demonstration of a mode transformation effect in 300-GHz CW clinotron. In: *17th Int. Conf. Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET 2018)*: conf. proc. Kyiv, June. DOI: 10.1109/MMET.2018.8460346.
47. Kovshov, Yu.S., Ponomarenko, S.S., Kishko, S.A., Likhachev, A., Danik, A., Mospan, L., Steshenko, S., Khutoryan, E.M., Kuleshov, A.N., 2018. Effect of Mode Transformation in THz Clinotron. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, **39**(11), pp. 1055–1064. DOI: 10.1007/s10762-018-0534-y.
48. Kovshov, Yu.S., Ponomarenko, S.S., Kishko, S.A., Khutoryan, E.M., Kuleshov, A.N., 2018. Numerical simulation and experimental study of Sub-THz and THz CW clinotron oscillators. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **65**(6), pp. 2177–2182.
49. Lysenko, Ye.Ye., Pishko, O.F., Churilova, S.A., 1999. Experimental Research of Clinotron with Distributed Quasioptical Power Output. *Radio phys. radio astron.*, **4**(1), pp. 13–20 (in Russian).
50. Borodkin, A.I., Buzik, L.M., Lysenko, E.E., 1980. *The study of multi-stage slow wave systems grating type*. Preprint Institute for radiophysics and electronics AS UkrSSR. No 151. Kharkov: Institute for radiophysics and electronics Publ. (in Russian).

51. Khutoryan, E.M., Ponomarenko, S.S., Kishko, S.A., Lukin K.A., Kuleshov A.N., Efimov B.P., 2013. Autooscillations in O-type oscillator at excitation of space-surface mode in resonator with a periodically inhomogeneous grating. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Prikladnaya nelineynaya dinamika*, **21**(2), pp. 9–19 (in Russian).
52. Kovshov, Yu.S., Khutoryan, E.M., Likhachev, A.S., Ponomarenko, S.S., Kishko, S.A., Lukin, K.A., Zavertanniy, V.V., Kudinova, T.V., Vlasenko, S.A., Kuleshov, A.N., Idehara, T., 2018. Excitation of hybrid space-surface waves in clinotrons with non-uniform grating. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, **39**(3), pp. 236–249.
53. Idehara, T., Kuleshov, A.N., Ueda, K., Khutoryan, E.M., 2014. Power-stabilization of high frequency gyrotrons using a double PID feedback control for applications to high power THz spectroscopy. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, **35**(2), pp. 159–168.
54. Kovshov, Yu.S., Kishko, S.A., Ivanov, A.I., Ponomarenko, S.S., Kuleshov, A.N., Yefimov, B.P., 2013. Stabilization of radiation frequency in submillimeter wavelength range BWO-oscillators. *Karazin HNU vestnik. Ser. Radiofizika i elektronika*, **23**(1094), pp. 77–83 (in Russian).

Received 17.12.2018

A.A. Likhachev¹, A.A. Danik¹, Yu.S. Kovshov¹, S.A. Kishko¹,
S.S. Ponomarenko¹, E.M. Khutoryan¹, A.M. Kuleshov¹, A.S. Tischenko¹,
V.V. Zavertanniy¹, A.F. Zabrodskiy¹, S.M. Terekhin¹, T.V. Kudinova¹, L.A. Kirichenko¹,
L.A. Galushko¹, Yu.S. Klesheva¹, G.S. Bezrodnaya¹, S.A. Vlasenko^{1,2}

¹O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine
12, Acad. Proskura St., Kharkov, 61085, Ukraine

²V.N. Karazin Kharkiv National University
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

DEVELOPMENT OF COMPACT GENERATOR
COMPLEXES BASED ON TERAHERTZ CLINOTRONS
IN O.Ya. USIKOV IRE NAS OF UKRAINE

Subject and purpose. This paper deals with the results, those were recently obtained in Vacuum Electronics Department of O.Ya. Usikov Institute of Radio Physics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, in the development of compact complexes generating electromagnetic radiation in the terahertz frequency range. These complexes are intended to carry out experimental researches in the field of nuclear magnetic resonance spectroscopy using the dynamic nuclear polarization technique.

Methods and methodology. In order to simulate the frequency characteristics, the model of the beam-wave interaction was improved by taking into account mutual transformations and reflections of the surface and highest waves in clinotron electromagnetic system. The methods of statistical analysis of the experimental data of developed and tested clinotrons were applied to clarify the obtained results. The values of the space charge, the oscillation optimum phase shift for the SWS period, the length and Pierce gain parameter were determined in respect to the operating frequency.

Results. Theoretical and experimental investigation results of the intense electron beams transport in weakly inhomogeneous magnetic focusing fields have been obtained; the interaction of EB with RF fields of SWS was studied; the propagation of surface and highest waves and their mutual transformations on in homogeneities of clinotron electromagnetic systems were simulated; and also the RF ohmic losses caused by the surface roughness of the SWS and thermal effects caused by falling EB were studied.

The generation of oscillations in packaged clinotrons in the frequency range 120...410 GHz was experimentally obtained. The developed systems demonstrate the frequency stability of the generated electromagnetic radiation at a level of 1...30 ppm in the frequency range of 120...410 GHz and provide levels of output power about 100 mW at a frequency of 300 GHz.

Conclusions. The ways of both output power and stability increase in THz clinotrons are proposed. Methods for a reduction of the effect of RF ohmic losses on the efficiency of beam-wave interaction in THz clinotrons by using multi-stage SWS and electromagnetic systems with a small length parameter have been investigated.

Key word: *clinotron, terahertz radiation, DNP-NMR spectroscopy, high-voltage power supplies, RF ohmic losses, slow-wave system.*

О.О. Лихачев¹, О.О. Даник¹, Ю.С. Ковшов¹, С.О. Кишко¹,
С.С. Пономаренко¹, Е.М. Хуторян¹, О.М. Кулешов¹, [А.С. Тищенко],
В.В. Завертанний¹, О.Ф. Забродський¹, С.М. Терехин¹, Т.В. Кудінова¹, Л.О. Кириченко¹,
Л.О. Галушко¹, Ю.С. Клещева¹, Г.С. Безродна¹, С.О. Власенко^{1,2}

¹ Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

² Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
4, майдан Свободи, Харків, 61022, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ КОМПАКТНИХ ГЕНЕРАТОРНИХ КОМПЛЕКСІВ НА ОСНОВІ КЛИНОТРОНІВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ В ІРЕ ІМ. О.Я. УСИКОВА НАН УКРАЇНИ

Предмет і мета роботи. У статті викладено результати, які були досягнуті останнім часом у відділі вакуумної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України при створенні компактних комплексів для генерації електромагнітного випромінювання в терагерцовому (ТГц) діапазоні частот. Ці комплекси використовують клинотропи як генератори електромагнітних коливань і призначені для проведення експериментальних досліджень в області спектроскопії ядерного магнітного резонансу із застосуванням техніки динамічної поляризації ядер.

Методи і методологія роботи. Для розрахунку частотних характеристик модель електронно-хвильової взаємодії клинотрона було доповнено алгоритмом урахування взаємних перетворень і відбиттів на неоднорідностях електродинамічної системи поширюваних поверхневої і вищих хвиль. Для уточнення отриманих результатів застосовано методи статистичного аналізу експериментальних параметрів відомих клинотронів. Встановлено значення оптимального зсуву фаз коливань на період сповільнювальної системи (СС), параметрів просторового заряду, довжини СС і посилення за Пірсом залежно від частоти.

Результати роботи. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження процесів транспортування інтенсивних електронних пучків (ЕП) у слабонеоднорідних магнітних фокусуєчих полях, електронно-хвильової взаємодії ЕП з високочастотними (ВЧ) полями СС, поширення поверхневих і вищих хвиль, їх взаємної трансформації на неоднорідностях електродинамічної системи. Досліджено омичні ВЧ-втрати, що викликані шорсткістю поверхні СС і тепловим впливом з боку падаючого ЕП. Експериментально отримано генерацію коливань у пакетованих клинотронах у діапазоні частот від 120 до 410 ГГц. Розроблені комплекси демонструють стабільність частоти генерованого електромагнітного випромінювання на рівні 1...30 мд у діапазоні частот 120...410 ГГц і забезпечують рівень вихідної потужності близько 100 мВт на частоті 300 ГГц.

Висновок. Запропоновано шляхи підвищення потужності і стабільності генерації клинотронів ТГц-діапазону частот. Розглянуто методи зниження впливу омичних ВЧ-втрат на процес електронно-хвильової взаємодії в клинотронах ТГц-діапазону шляхом застосування багатоступеневих СС, а також систем з малим параметром довжини.

Ключові слова: клинотрон, терагерцове випромінювання, динамічна поляризація ядер, ядерно-магнітний резонанс, спектроскопія, високовольтні джерела живлення, високочастотні омичні втрати, сповільнювальна система.