

Ю. С. Ковшов¹, С. А. Кишко¹, С. С. Пономаренко¹, С. А. Власенко^{1,2}, Ю. С. Новикова-Коротун¹,
В. В. Завертанный¹, А. Н. Кулешов¹

¹Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: jeanalexkh@gmail.com

²Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КЛИНОТРОНОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 125...135 ГГц

Разработка компактных генераторов электромагнитного излучения, способных в непрерывном режиме обеспечить уровни мощности в единицы ватт и выше в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, является актуальной задачей для большого числа практических приложений, в частности, для повышения чувствительности спектрального анализа на ядерно-магнитном резонансе с динамической поляризацией ядер. Проведено моделирование параметров клинотрона с центральной рабочей частотой 130 ГГц на основе результатов экспериментальных исследований параметров однотипных генераторов 2-мм диапазона волн. По результатам проведенного анализа рабочих характеристик генераторов определены частотные зависимости параметров пространственного заряда, параметра усиления по Пирсу, а также числа замедленных волн, укладываемых вдоль системы. Полученные значения использованы при расчете замедляющих систем типа «плоская гребенка», а также при последующем моделировании рабочих характеристик клинотронов с данными системами. По результатам моделирования предложены конструкции клинотронов с однородной и четырехступенчатой замедляющей системой. Экспериментально получена генерация колебаний в генераторе с однородной замедляющей системой в диапазоне частот 125...135 ГГц. Изучены пусковые условия генерации в зависимости от величин тока пучка и индукции фокусирующего магнитного поля. В процессе экспериментального исследования рабочих характеристик данного клинотрона показано хорошее соответствие полученных данных и результатов теоретического моделирования. Предложено использование изложенной методики расчета электродинамической системы для клинотронов в соседних диапазонах длин волн. Ил. 11. Библиогр.: 29 назв.

Ключевые слова: клинотрон, многоступенчатая плоская гребенка, дисперсия, сопротивление связи, оптимальный сдвиг фаз колебаний, электронно-волновое взаимодействие.

Необходимость в компактных источниках электромагнитного излучения средней мощности (1...10 Вт) короткой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов определяется перспективными разработками в области молекулярной спектроскопии, методе неразрушающего контроля соединений, обеспечения безопасности и др. [1, 2]. В основной массе данные потребности компенсируют гирорезонансные приборы, лампы обратной волны (ЛОВ) и маломощные полупроводниковые генераторы, работающие, как правило, с секциями умножителей частоты. При этом вакуумные источники являются, по сути, экспериментальными изделиями с уникальными характеристиками [3, 4].

В настоящее время процесс создания вакуумных источников электромагнитного излучения сводится к моделированию рабочих характеристик прибора по заданным параметрам электронного потока, распределению магнитного фокусирующего поля и параметрам электродинамической системы [5, 6]. Моделирование условий возбуждения колебаний и определение эффективности электронно-волнового взаимодействия производится путем решения системы самосогласованных уравнений Максвелла и уравнений движения. Распространенными методами решения данной задачи является моделирование при помощи метода «частиц в ячейках» или слабосигнального приближения [7–9]. Каждый из под-

ходов обладает своими преимуществами, однако следует отметить, что общей особенностью является принятие ряда упрощений при постановке задачи. Особенно сложным при таких расчетах является учет высокочастотных потерь в системе взаимодействия, действительная величина которых может быть определена только экспериментальным путем [10]. Кроме перечисленных выше параметров, на характеристики генератора оказывают влияние неточности, допущенные при изготовлении и сборке узлов генератора, величину и степень влияния которых определить практически невозможно.

В данной статье предлагается использовать статистическую обработку экспериментальных параметров клинотронов с целью уточнения их выходных характеристик, получаемых в результате численного моделирования параметров электронно-волнового взаимодействия. В процессе исследований предполагается определение не только экспериментальных зависимостей оптимального сдвига фаз на период системы при максимуме выходной мощности [11, 12], но и значения пространственного заряда QC , усиления по Пирсу C и параметра CN , которые устанавливают зависимости между током пучка, ускоряющим напряжением, геометрией электронного потока и параметрами пространства взаимодействия [13].

Данная работа состоит из трех основных разделов. В первом разделе проведен анализ экс-

периментальных характеристик клинотронов 130 ГГц диапазона частот и определены частотные зависимости параметров QC и CN для клинотронов 2-мм диапазона волн. В разд. 2 изложены результаты численного моделирования замедляющих систем для клинотронов с центральной рабочей частотой 130 ГГц при учете закономерностей, определенных в разд. 1. Результаты экспериментального исследования частотных характеристик клинотрона с однородной замедляющей системой, предназначенного для работы с центральной частотой 130 ГГц, представлены в разд. 3.

1. Статистическая обработка рабочих параметров клинотронов 130 ГГц диапазона. Из линейной теории ЛОВ известно, что частотная характеристика и пусковые условия определяются в предположении бесконечности коэффициента усиления из решения характеристического уравнения, которое зависит от параметров усиления C , пространственного заряда QC и CN . Значения этих параметров определяются следующими выражениями [13, 14]:

$$C = \left(\frac{I_0 R_c}{4U_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad QC = \left(\frac{\omega_p}{2C\omega} \right)^2, \quad CN = \frac{CL\varphi}{2\pi p}, \quad (1)$$

где I_0 – ток электронного пучка; U_0 – ускоряющее напряжение; R_c – сопротивление связи электронного потока с высокочастотным полем; ω_p – плазменная частота; ω – частота генерации; L и p – длина и период замедляющей системы соответственно; φ – сдвиг фазы колебаний на период системы. Выражения (1) используются в ряде работ для анализа рабочих характеристик клинотронов [11]. В данной работе при проведении анализа значения CN и QC определялись для каждой зоны генерации клинотронов с учетом известных геометрических параметров их замедляющих систем и рабочих режимов. Также для каждой рабочей зоны производился расчет сопротивления связи с использованием методики, изложенной в [13]. Приведенные ниже результаты получены при исследовании приблизительно 350 приборов 2-мм диапазона. Для данных генераторов период замедляющей системы p находится в пределах 0,19...0,23 мм, а глубина нарезки $h = 0,425...0,565$ мм. Ускоряющее напряжение U_0 и величина тока пучка I_0 соответствовали стандартным для клинотронов величинам 1,8...4,2 кВ и 30...205 мА соответственно.

Значение оптимального сдвига фаз колебаний на период системы определялось по величине КПД генераторов. На рис. 1 точками с вертикальными отрезками указаны средние значения и стандартные отклонения КПД генераторов 2-мм диапазона в зависимости от рабочего фазового сдвига.

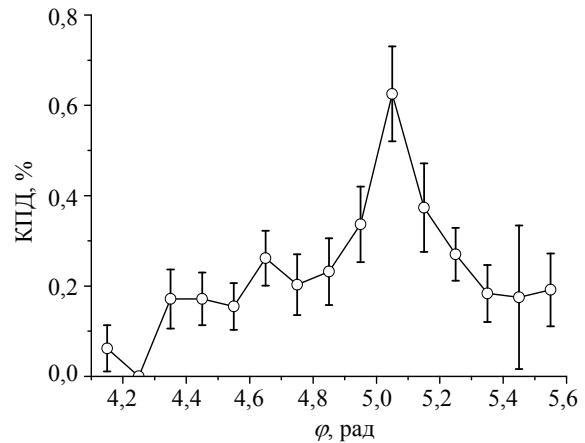


Рис. 1. КПД клинотронов 2-мм диапазона длин волн в диапазоне рабочих сдвигов фаз φ

Характеристика построена по результатам анализа приборов с периодом замедляющей системы $p = 0,2$ мм. Для данного набора ламп максимальный уровень выходной мощности составляет 2,25 Вт. Такие значения СВЧ-мощности достигаются при рабочем токе электронного пучка более 150 мА. Электронный КПД генераторов 2-мм диапазона, с учетом влияния характеристик вывода энергии, варьируется в пределах 0,05...0,7%. Как показано на рис. 1, максимум КПД достигается вблизи сдвига фаз 5,07 рад. Подобные зависимости, с выраженным максимумом по сдвигу фазы φ , характерны для клинотронов во всех частотных диапазонах. В процессе проведенного анализа было установлено, что для диапазона частот 110...140 ГГц оптимальные углы фазового сдвига варьируются от 5,05 до 5,1 рад, что не противоречит результатам, изложенным в [11].

Возбуждение колебаний в клинотронах 2-мм диапазона волн вблизи оптимального сдвига фаз происходит при значениях пространственного заряда $QC < 2$. С ростом QC возможно расширение полосы генерации колебаний за счет компенсации малой величины сопротивления связи с пучком в области низкочастотной отсечки. Как показано на рис. 2, значения QC при этом могут достигать значительных величин.

Точками на рис. 2 отмечены значения величины пространственного заряда для различных рабочих частот генераторов. В процессе аппроксимации приведенных экспериментальных данных использовалась функция вида $y = ae^{-x/b} + y_0$, при этом коэффициент детерминации R^2 составил 0,902, что соответствует высокой точности подбора закона распределения [15]. В результате зависимость величины пространственного заряда, необходимого для генерации колебаний в системе с приведенными выше параметрами, обладает следующими коэффициентами: $a = 1,26 \cdot 10^6$, $b = 9,694$, $y_0 = 0,0155$.

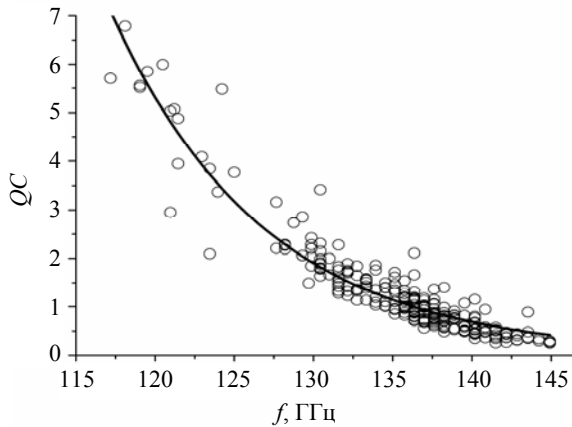


Рис. 2. Пространственный заряд Q_C для различных зон генерации клинотронов 2-мм диапазона длин волн. Аппроксимирующая функция показана сплошной кривой

На рис. 3 представлены аппроксимирующие функции вида $y = ax^b$ для значений параметра CN в зависимости от пространственного заряда Q_C для нескольких значений периода замедляющей системы.

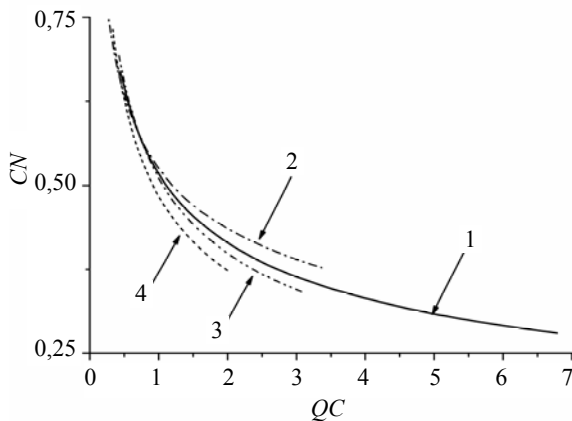


Рис. 3. График зависимости параметра CN от величины пространственного заряда Q_C для клинотронов 2-мм диапазона длин волн с различными периодами системы (кривая 1 – 0,19 мм; кривая 2 – 0,2 мм; кривая 3 – 0,22 мм; кривая 4 – 0,23 мм)

Значения коэффициентов детерминации R^2 для приведенных аппроксимирующих функций лежат в диапазоне 0,763...0,969. Как показано на данном графике, при малом значении пространственного заряда $Q_C < 1$ значения параметра CN для систем с различным шагом нарезки слабо отличаются между собой. С ростом значения Q_C наблюдается расхождение кривых, что может объясняться неточностью аппроксимации в связи с малым числом экспериментальных данных в данной области. В общем случае кривые 1–4 для $Q_C < 1$ с хорошей точностью можно описать следующим законом:

$$CN = \frac{1}{2}(Q_C)^{-\frac{1}{3}}. \quad (2)$$

Уравнение (2) соответствует известной из теории ЛОВ и клинотронов обратной зависимости величины стартового тока от длины пространства взаимодействия [11].

2. Моделирование параметров электродинамической системы клинотронов с однородной и четырехступенчатой плоской гребенкой. Приведенные выше значения оптимального сдвига фаз колебаний, а также зависимость $CN(Q_C)$ используются для определения параметров электронного потока и электродинамической системы генератора, рассчитываемого для работы с центральной частотой 130 ГГц. Для случая малого пространственного заряда и при параллельном электронном потоке выходная мощность ЛОВ генератора прямо пропорциональна ускоряющему напряжению, разнице рабочего и пускового токов пучка, а также обратно пропорциональна электрической длине замедляющей системы. Поэтому для обеспечения высокого уровня выходной мощности необходимо повышать ускоряющее напряжение и отношение рабочего тока к стартовому. При рассмотрении клинотронов оптимизации последнего из перечисленных параметров способствует также снижение величин стартового тока за счет резонансного возбуждения электродинамической системы генератора [16].

Обычно в клинотронах используются электронные пушки, работающие в диапазоне ускоряющих напряжений до 5...6 кВ. Однако в разрабатываемом генераторе 2-мм диапазона волн рабочее ускоряющее напряжение устанавливалось в пределах 2,5...3,5 кВ. Такой выбор был обусловлен необходимостью обеспечения «сходящего» режима работы катода и продления срока его службы. Работа катода предполагается в режиме температурного ограничения эмиссии, а рабочие величины тока электронного пучка должны составить порядка 150 мА. При выбранных характеристиках электронного потока величины параметра пространственного заряда и CN близки к 1,0 и 0,5 соответственно. В соответствии с реальными значениями КПД для рассматриваемого диапазона частот, выходная мощность генератора может достигать величин порядка 1,5 Вт.

Учитывая известное значение длины замедляющей системы 14...15 мм и пользуясь (1), определяем оптимальный период гребенки, который в соответствии с нашими расчетами равен 0,21 мм. Определение точного значения длины замедляющей системы происходит при оптимизации геометрии электродинамической системы генератора с использованием трехмерных электродинамических кодов аналогично процессу, изложенному в [17]. Производя расчет дисперсии и сопротивления связи в рабочем диапазоне частот, определяем необходимую глубину нарезки системы. На рис. 4 приведены дисперсионные характе-

ристики и соответствующие значения сопротивления связи при различных значениях глубины h .

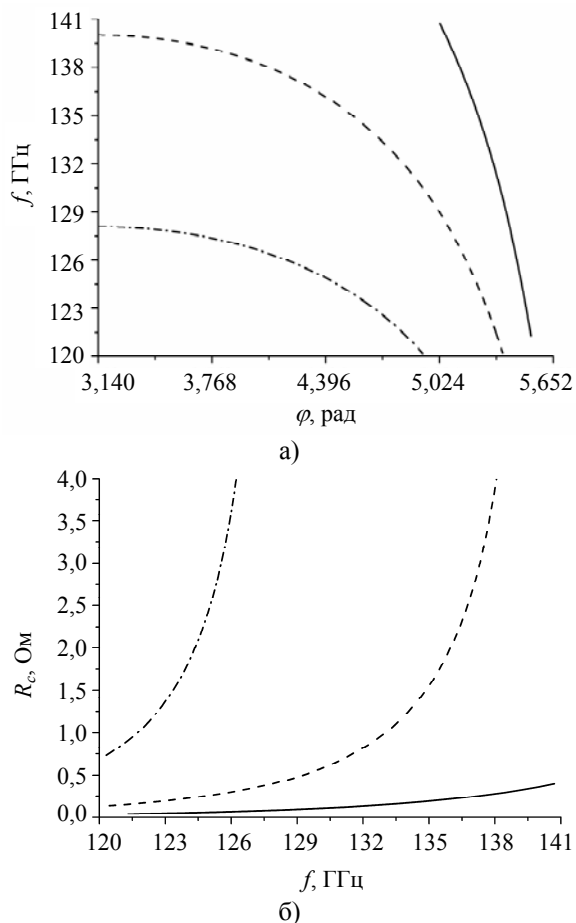


Рис. 4. Дисперсия плоской гребенки (а) и значение сопротивления связи (б) для систем с разной глубиной нарезки (— $h = 0,43$ мм, --- $h = 0,48$ мм, -.-.- $h = 0,53$ мм)

Условия возбуждения колебаний в клинотроне с приведенными выше параметрами исследованы методами численного моделирования нелинейных нестационарных уравнений возбуждения ламп с бегущими волнами [9, 18]. В первом приближении предполагается, что ленточный электронный поток транспортируется в бесконечно большом магнитном поле, при фиксированном угле наклона к плоскости замедляющей системы. Угол наклона соответствовал попаданию верхнего граничного электрона пучка на коллектор, что соответствует геометрическому объяснению клинотронного эффекта [11, 19]. Уравнения возбуждения решались конечно-разностным методом с использованием M крупных частиц. В рассматриваемой модели учет потерь и отражений от концов замедляющей системы [20] не производился.

На рис. 5 приведены нормированные значения амплитуды выходного сигнала от тока электронного пучка в диапазоне рабочих частот

124...134 ГГц. Стартовый ток составляет 50 мА на частоте 134,62 ГГц и порядка 70 мА – на частоте 130 ГГц. Повышение тока пучка до 200 мА на частотах до 131 ГГц характеризуется одночастотной генерацией. Свыше 131 ГГц при токе пучка 150...190 мА наблюдается периодическая модуляция выходного сигнала. В данном случае модуляция является результатом перегруппировки электронного потока. При токе пучка 150 мА на частоте 134,62 ГГц наблюдается максимум мощности, а при больших значениях тока – режим автомодуляции. В реальных генераторах автомодуляция также является следствием конкуренции колебаний между соседними модами и влияния поперечных компонент высокочастотного электрического поля [21, 22].

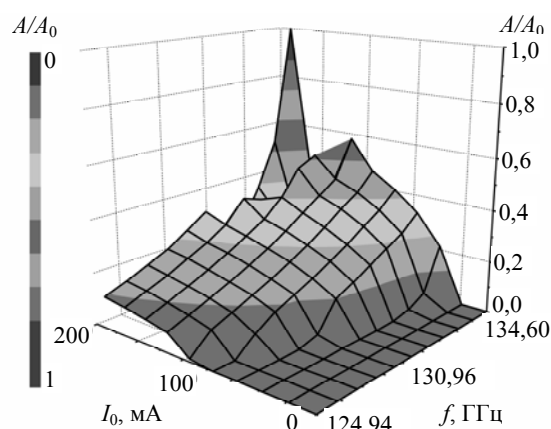


Рис. 5. Нормированная амплитуда выходного сигнала клинотрона 2-мм диапазона в координатах «частота – ток пучка»

В работе [23] с целью снижения влияния омических потерь на работу генератора было предложено использование многоступенчатых замедляющих систем. Как было показано на примере клинотрона с трехступенчатой плоской гребенкой [24], в режиме возбуждения поверхностных колебаний 3-мм диапазона длин волн возможно обеспечение уровня выходной мощности более 2 Вт. Таким образом, значительный интерес представляет сравнение реальных рабочих характеристик идентичных генераторов с однородной и многоступенчатой системами.

Число ступеней системы определяется исходя из значения оптимального сдвига фаз для соответствующего частотного диапазона [25, 26]. Принимая во внимание значения $\varphi_{\text{опт}}$ для 2-мм диапазона волн, использование трехступенчатых систем на данных частотах является нецелесообразным. Область междутипового взаимодействия колебаний соответствует неоптимальным фазам φ (рис. 6). В результате авторами была выбрана четырехступенчатая плоская гребенка с рабочей второй составляющей второй полосы пропускания.

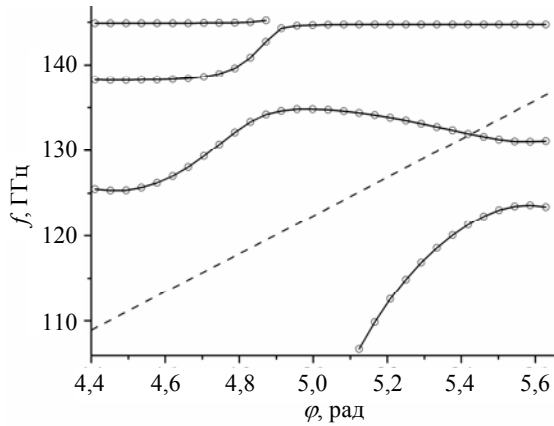


Рис. 6. Дисперсионная характеристика 3-ступенчатой плоской гребенки для малого периода (кривые $\circ-\circ-$); линия пучка при $U_0 = 3$ кВ ($---$)

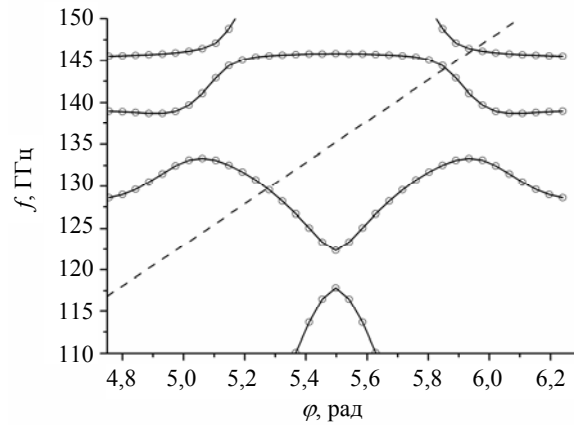
Малый период системы (0,21 мм) и глубина нарезки малых резонаторов соответствуют рассмотренной выше однородной гребенке. При этом соотношение глубин большого и малого резонаторов $h_2/h_1 = 1,1$ обеспечивает более эффективный отбор энергии от электронного пучка, чем при $h_2/h_1 = 1,3$ [27].

Дисперсионная характеристика и значение мощности взаимодействия P_i электронного потока с полем волновода, нагруженного такой замедляющей системой, приведены на рис. 7.

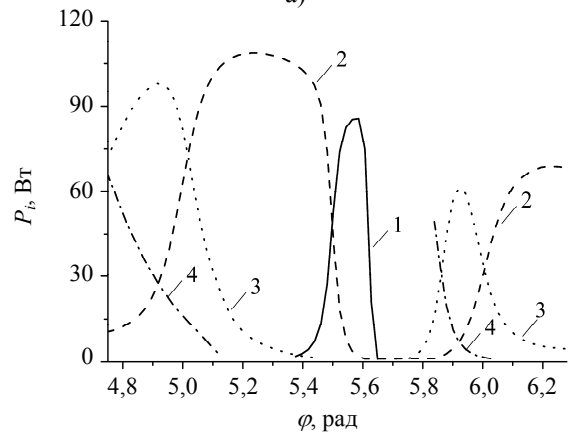
Значения P_i определены для случая существования диэлектрических потерь в канавках гребенки с тангенсом угла потерь $5 \cdot 10^{-4}$. Линия пучка, изображенная на рис. 7, а, пересекает дисперсионные кривые в третьей и четвертой полосах пропускания вблизи 146 ГГц, что может приводить к режимам конкуренции колебаний. Однако изменение высоты положения экрана над замедляющей системой позволяет отстроиться от таких режимов.

3. Экспериментальное исследование частотных характеристик клинотронов. Однородная и четырехступенчатая замедляющие системы генераторов изготовлены электроискровым методом. В генераторах применяется ленточный пучок, формируемый диодной электронной пушкой с импрегнированным катодом, который позволяет достигать плотности тока порядка $40 \dots 60$ А/см². Фокусировка электронного потока осуществляется в магнитном поле с индукцией $0,7 \dots 0,8$ Тл, создаваемом лабораторным электромагнитом в зазоре 35 мм.

Фотография экспериментального образца клинотрона 2-мм диапазона приведена на рис. 8. На данном этапе исследований проведены измерения частотной характеристики и выходной мощности СВЧ-колебаний генератора с однородной плоской гребенкой.



а)



б)

Рис. 7. Дисперсионная характеристика (а) 4-ступенчатой плоской гребенки и значение мощности взаимодействия (б) для первых 4 полос пропускания (1 – первая, 2 – вторая, 3 – третья, 4 – четвертая полосы); линия пучка при $U_0 = 3$ кВ ($---$)

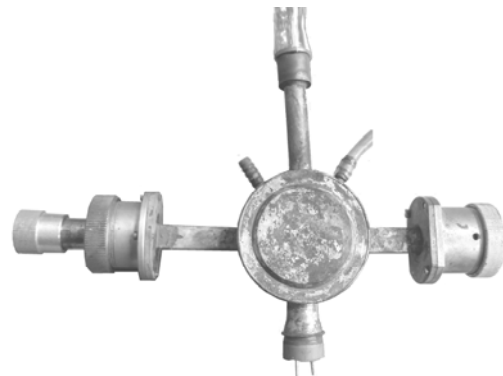


Рис. 8. Экспериментальный клинотрон 2-мм диапазона с однородной плоской гребенкой

Частотные измерения производились камерным волномером, в импульсном режиме питания ускоряющим напряжением с длительностью импульсов 10 мс и частотой повторения 50 Гц. На экране осциллографа регистрировалась временная развертка сигнала с СВЧ-детектора и делителя высоковольтного напряжения. Это позволяло с высокой точностью установить значе-

ния напряжения для каждой зоны генерации колебаний. Измерения производились при нескольких пиковых значениях ускоряющего напряжения в диапазоне 2,0...4,0 кВ.

На рис. 9 приведена экспериментальная дисперсионная характеристика клинотрона с однородной гребенкой. Маркерами указана центральная частота в зоне генерации. Вертикальными отрезками обозначены границы зоны. Пунктирной линией на графике приведена расчетная дисперсия «холодной» гребенки. Очевидно, что экспериментальные значения рабочих частот хорошо согласуются с результатами расчетов.

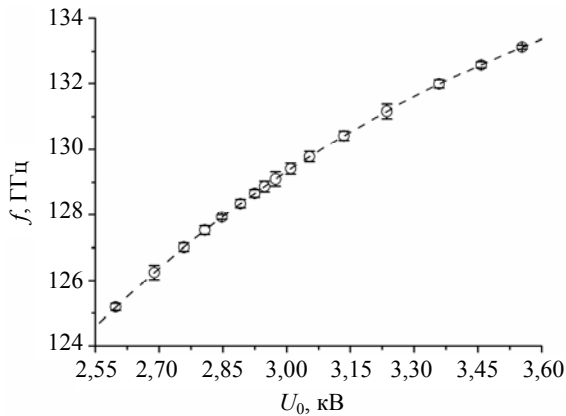


Рис. 9. Дисперсионная характеристика клинотрона 2-мм диапазона с однородной плоской гребенкой

Генерация колебаний в клинотроне наблюдается в диапазоне частот 125...135 ГГц. Величина стартовых токов в постоянном режиме составляет порядка 50...80 мА, что согласуется со значениями стартовых токов, определенными в предыдущем разделе в рамках принятых допущений. Максимальное значение генерируемой мощности соответствует диапазону частот 130,12...130,7 ГГц. При снижении величины фокусирующего магнитного поля отчетливо наблюдается снижение амплитуды сигнала на СВЧ-детекторе и на измерителе мощности.

Зависимость выходной СВЧ-мощности от частоты генерации приведена на рис. 10. В данном случае ускоряющее напряжение изменялось в пределах 2,7...3,7 кВ, а ток электронного пучка составлял 95 и 113 мА. Следует отметить, что в стартовом режиме выходная мощность генератора на частоте 130 ГГц составляет 95 мВт. Таким образом, дальнейшее повышение стартового тока до 150...180 мА будет способствовать росту мощности генерируемых колебаний до расчетных величин.

На клинотроне с четырехступенчатой системой в настоящее время проводятся испытания катодного узла электронно-оптической системы с

целью выхода на рабочий режим. Результаты экспериментальных исследований характеристик данного генератора будут изложены в следующих публикациях. После завершения серии экспериментов по исследованию особенностей электронно-волнового взаимодействия в генераторах с однородной и многоступенчатой гребенкой предполагается их пакетирование в постоянные магнитные фокусирующие системы.

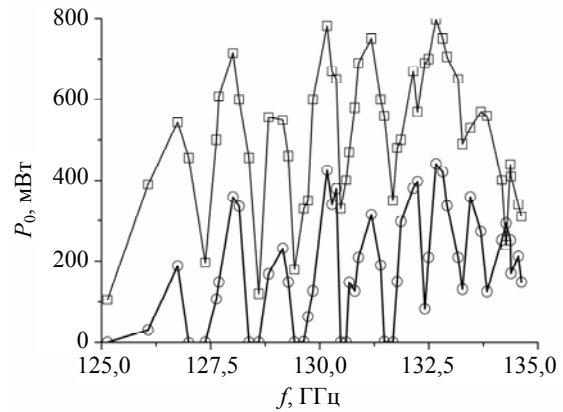


Рис. 10. Выходная мощность экспериментального клинотрона при токе электронного пучка 95 мА (кривая -○-), 113 мА (кривая -□-)

С этой целью были разработаны и созданы компактные магнитные системы на основе сплава Nd-Fe-B, формирующие магнитное поле величиной более 0,5 и 0,8 Тл. На рис. 11 представлена фотография магнитной системы с полем в зазоре не менее 0,5 Тл, габаритные размеры которой составляют 80 × 86 мм; масса пакетированного в такую систему клинотрона не превышает 2,5 кг.

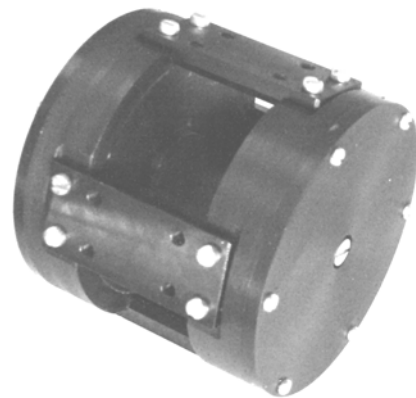


Рис. 11. Компактная магнитная фокусирующая система для клинотронов 2-мм диапазона

Выводы. Анализ экспериментальных данных работы клинотронов 2-мм диапазона длин волн позволил установить диапазоны значений оптимального сдвига фаз колебаний на период

замедляющей системы, рабочих значений пространственного заряда QC , усиления по Пирсу C и параметра CN . На основе полученных результатов проведено моделирование дисперсионных характеристик электродинамических систем клинотронов с плоскими гребенками, оптимальными для работы на частоте 130 ГГц. В ходе моделирования процесса взаимодействия электронного потока с полем синхронной пространственной гармоники для выбранной конфигурации замедляющей системы определены значения пускового тока и границы области одночастотной генерации.

Экспериментально исследованы колебания в генераторе с оптимальной однородной замедляющей системой в диапазоне частот 125...135 ГГц. Изучены стартовые условия возбуждения колебаний в генераторе с такой системой. В результате проведенных экспериментальных исследований показано, что генератор с замедляющей системой, рассчитанной для эффективного электронно-волнового взаимодействия на частоте 130 ГГц, обладает максимумом интенсивности выходного излучения на частоте 130,42 ГГц. Таким образом, методика расчета замедляющей системы, предложенная в данной работе, может быть использована при разработке эффективных генераторов с заданными частотными и амплитудными характеристиками в соседних диапазонах.

Авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук Э. М. Хуторяну за помощь в проведении численного моделирования, а также при обсуждении полученных результатов.

Библиографический список

1. *Terahertz BWO-spectroscopy* / B. Gorshunov, A. Volkov, I. Spektor et al. // *J. Inf., Mill. and Terahertz Waves*. – 2005. – 26, N 9. – P. 1217–1240.
2. *Markets T. H.* Availability, notice, and technical performance of terahertz systems: historic development, present, and trends / T. H. Markets // *J. Infrared Mill. Terahertz Waves*. – 2015. – 36, N 3. – P. 235–254.
3. *Vacuum electronic high power terahertz sources* / J. H. Booske, R. J. Dobbs, C. D. Joye et al. // *Trans. Terahertz Sci. and Tech.* – 2011. – 1, N 1. – P. 54–75.
4. *400 GHz Continuous-Wave Clinotron Oscillator* / S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, E. M. Khutoryan et al. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2013. – 41, N 1. – P. 82–86.
5. *Dayton J. A.* Backward Wave Oscillator Development at 300 and 650 GHz / J. A. Dayton, Jr. Carol L. Kory, G. T. Mearini // *Proc. IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC-2006)*. – Monterey, 2006. – P. 423–424.
6. *Mineo M.* Corrugated Rectangular Waveguide Tunable Backward Wave Oscillator for Terahertz Applications / M. Mineo, C. Paoloni // *IEEE Trans. Elec. Dev.* – 2010. – 57, N 6. – P. 1481–1484.
7. *Трехмерное моделирование плазмы методом частиц в ячейках на Intel Xeon Phi: оптимизация вычислений и примеры использования* / И. Б. Мееров, С. И. Бастраков, И. А. Сурмин и др. // *Суперкомпьютерные дни в России*. – М., 2015. – С. 495–508.
8. *Вайнштейн Л. А.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике / Л. А. Вайнштейн, В. А. Солнцев. – М.: Сов. радио, 1973. – 593 с.
9. *Шевчик В. Н.* Электроника ламп обратной волны / В. Н. Шевчик, Д. И. Трубецков. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 195 с.
10. *Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн* / Е. М. Гершензон, М. Б. Голант, А. А. Негирев и др.; под ред. Н. Д. Девяткова. – М.: Радио и связь, 1985. – 250 с.
11. *Клинотрон* / Г. Я. Левин, А. И. Бородкин, А. Я. Кириченко и др. – К.: Наук. думка, 1992. – 157 с.
12. *Мильчо М. В.* Взаимодействие электронов с поперечной продольной составляющей высокочастотного поля в генераторах типа клинотрон / М. В. Мильчо // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2007. – 12, спец. вып. – С. 59–70.
13. *Альтшулер Ю. Г.* Лампы малой мощности с обратной волной / Ю. Г. Альтшулер, А. С. Татаренко. – М.: Сов. радио, 1963. – 296 с.
14. *Лебедев И. В.* Техника и приборы СВЧ: в 2 т. Т. 1. – М.: Высш. школа, 1972. – 405 с.
15. *Харченко М. А.* Корреляционный анализ: учеб. пособие для вузов / М. А. Харченко. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2008. – 31 с.
16. *Ефимов Б. П.* Многоволновый резонансный клинотрон миллиметрового диапазона / Б. П. Ефимов // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2007. – 12, спец. вып. – С. 71–80.
17. *Пишко О. Ф.* Электродинамические характеристики выходного устройства клинотрона / О. Ф. Пишко, В. Г. Чумак, С. А. Чурилова // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2007. – 12, спец. вып. – С. 130–133.
18. *Гинзбург Н. С.* Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ / Н. С. Гинзбург, С. П. Кузнецов, Т. Н. Федосеева // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 1979. – 21, № 7. – С. 1978–1052.
19. *Бородкин А. И.* Об улучшении условий взаимодействия электронного потока с полем поверхностной волны в клинотроне при работе в слабо неоднородном магнитном поле / А. И. Бородкин, А. Я. Кириченко, Г. Я. Левин // *Тр. Ин-та радиофизики и электрон. АН УССР*. – X., 1961. – 9. – С. 273–277.
20. *Theory of relativistic backward wave oscillator with end reflections* / V. Levush, T. M. Antonsen, A. Bromborsky et al. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 1992. – 20, N 3. – P. 263–280.
21. *Automodulation Processes in Clinotrons With Low-Focusing Magnetic Field* / M. Sattarov, E. M. Khutoryan, K. Lukin et al. // *IEEE Trans. Elec. Dev.* – 2015. – 62, N 5. – P. 1617–1621.
22. *Khutoryan E.* Theory of Multimode Resonant Backward-Wave Oscillator With an Inclined Electron Beam / E. Khutoryan, M. Sattarov, K. Lukin et al. // *IEEE Trans. Elec. Dev.* – 2015. – 62, N 5. – P. 1628–1634.
23. *Колебания в генераторе О-типа при возбуждении объемно-поверхностной моды резонатора с периодически неоднородной гребенкой* / Э. М. Хуторян, С. С. Пономаренко, С. А. Кишко и др. // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. – 2013. – 21, № 2. – С. 9–19.
24. *Development of 94 GHz BWO – klynotron with 3-stage grating* / S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, E. M. Khutoryan et al. // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2014. – 73, N 3. – P. 271–281.
25. *Лысенко Е. Е.* Экспериментальное исследование клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии / Е. Е. Лысенко, О. Ф. Пишко, С. А. Чурилова // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 1999. – 4, № 1. – С. 13–20.
26. *Бородкин А. И.* Исследование многоступенчатых замедляющих систем гребенчатого типа / А. И. Бородкин, Л. М. Бузык, Е. Е. Лысенко // *ИРЭ АН УССР, 1980*. – 39 с. (Препр. / АН УССР, Ин-т радиофизики и электрон.; ИРЭ 1980-151).
27. *Sub-THz CW Clinotrons with Multi-Stage Gratings* / Yu. S. Kovshov, S. A. Kishko, S. S. Ponomarenko, A. N. Kule-

- shov // Proc. 1st Int. Young Scientists Forum on Appl. Phys. (YSF-2015). – Dnipropetrovsk, 2015. – Forum Proc. CD (ISBN: 978-1-4673-6976-3), MTE-2 (4 p.).
28. Nusinovich G. S. Mode Interaction in Backward-Wave Oscillators with Strong End. Reflections / G. S. Nusinovich, Yu. P. Bliokh // Phys. Plasmas. – 2000. – 7, N 4. – P. 1294–1301.
29. Ефимов Б. П. Экспериментальное исследование влияния отражений на частотные характеристики ЛОВ миллиметрового диапазона / Б. П. Ефимов, А. Я. Кириченко, А. П. Бужинский // Тр. Ин-та радиопроизводства и электрон. АН УССР. – X., 1967. – 15. – С. 130–133.

Рукопись поступила 10.04.2016.

Yu. S. Kovshov, S. A. Kishko, S. S. Ponomarenko,
S. A. Vlasenko, Yu. S. Novikova-Korotun,
V. V. Zavertanniy, A. N. Kuleshov

SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESEARCH ON CW CLINOTRON IN FREQUENCY RANGE 125...135 GHz

The development of compact oscillators of electromagnetic radiation capable of providing the output power higher than several Watt in millimeter and sub-millimeter ranges is an actual task for a large number of practical applications, in particular, to enhance the sensitivity of DNP NMR spectroscopy. The simulation of 130 GHz CW Clinotron was carried out on basis of experimental results of the earlier developed CW Clinotrons in 2mm wavelength range. Basing on the analysis of oscillator operation characteristics, the space charge dependence on frequency, Pierce parameter and the system electrical length were determined. The obtained results were used in the simulation of grating and in further simulation of operation parameters of clinotron tubes. Basing on simulation results, the clinotrons with homogeneous and four-stage grating were designed. The output power more than one Watt in CW clinotron with homogeneous grating in the frequency range 125...135 GHz was experimentally obtained. Start current and required focusing magnetic field were obtained in the experimental test in electromagnet. The experimental test also shows the close fit between simulation results and experimental data. The proposed method can be used in the simulation of CW clinotrons in both millimeter and sub-millimeter ranges.

Key words: clinotron, multi-stage grating, dispersion, coupling impedance, optimal phase shift, beam-wave interaction.

Ю. С. Ковшов, С. О. Кишко, С. С. Пономаренко,
С. О. Власенко, Ю. С. Новікова-Коротун,
В. В. Завертанний, О. М. Кулешов

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КЛІНОТРОНІВ БЕЗПЕРЕПВНОЇ ДІЇ В ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ 125...135 ГГц

Розробка компактних генераторів електромагнітного випромінювання, які здатні у безперервному режимі забезпечувати рівні потужності в одиниці ватт та вище у міліметровому й субміліметровому діапазонах, є актуальною задачею для великої кількості практичних застосувань, зокрема, з метою підвищення чутливості спектрального аналізу на ядерно-магнітному резонансі з динамічною поляризацією ядер. Проведено моделювання параметрів клінотрона з центральною робочою частотою 130 ГГц на основі результатів, що отримано у ході експериментальних досліджень параметрів однотипних генераторів 2-мм діапазону хвиль. За результатами аналізу робочих характеристик генераторів визначено частотні залежності параметрів просторового заряду, параметра підсилення Пірса, а також електричної довжини системи. Отримані результати використано у розрахунку систем типу «пласка гребінка», що сповільнює рух, а також у подальшому моделюванні робочих характеристик клінотронів з даними системами. За результатами моделювання запропоновано конструкції клінотронів з однорідною та чотириступеневою сповільнювальною системою. Експериментально отримано генерацію коливань в генераторі з однорідною сповільнювальною системою, в діапазоні частот 125...135 ГГц. Вивчено пускові умови генерації залежно від величин струму пучка та індукції магнітного поля, що фокусує. У процесі експериментального дослідження робочих характеристик даного клінотрону показано добру відповідність отриманих результатів з результатами теоретичного моделювання. Запропоновано використання викладеної методики розрахунку електродинамічної системи для клінотронів сусідніх діапазонах довжин хвиль.

Ключові слова: клінотрон, багатоступенева пласка гребінка, дисперсія, опір зв'язку, оптимальний зсув фаз коливань, електронно-хвильова взаємодія.