

УДК 621.385.6

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА С КОЛЕБАНИЯМИ СДВОЕННЫХ И МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ В ЛОВ-КЛИНОТРОНАХ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

С.С. Пономаренко, А.Н. Кулешов, Б.П. Ефимов

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

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

E-mail: sergyponomarenko@gmail.com

Поступила в редакцию 22 октября 2013 г.

В статье исследованы режимы работы ЛОВ-клинотронов со сдвоенными и многоступенчатыми замедляющими системами. Сравнение результатов расчетов параметров взаимодействия ленточных электронных пучков с поверхностными волнами сдвоенных замедляющих систем показали, что для случая со сдвоенными плоскими гребенками в синфазном режиме колебаний характерно высокое сопротивление связи и узкая полоса рабочих частот. В случае сдвоенных ленточных замедляющих систем сопротивление связи ниже по сравнению со сдвоенными гребенками, но значительно шире диапазон электронной перестройки частоты. В соответствии с результатами моделирования сконструированы два экспериментальных макета ЛОВ-клинотронов со сдвоенными замедляющими системами и получена эффективная генерация колебаний в диапазоне частот 33-39 ГГц. В генераторе со сдвоенной ленточной замедляющей системой пусковые токи составили 5-8 мА в диапазоне ускоряющих напряжений 1,4-1,75 кВ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сдвоенная замедляющая система, многоступенчатая замедляющая система, гибридные колебания, сопротивление связи поверхностной волны с ленточным пучком, снижение пускового тока, синфазный и противофазный режим колебаний, ЛОВ-клинотрон.

У статті досліджені режими роботи ЛЗХ-клінотронів зі здвоєними та багатоступеневими системами, що сповільнюють рух хвилі. Порівняння результатів розрахунків параметрів взаємодії стрічкових електронних пучків з поверхневими хвилями здвоєних систем показали, що у випадку зі здвоєними плоскими гребінками у синфазному режимі коливаль характерним є високий опір зв'язку і вузька смуга робочих частот. У випадку здвоєних стрічкових систем опір зв'язку є нижчим в порівнянні зі здвоєними гребінками, але діапазон електронної перебудови частоти є значно ширшим. Відповідно до результатів моделювання сконструйовано два експериментальних макета ЛЗХ-клінотронів зі здвоєними системами та отримана ефективна генерація електромагнітних коливаль в діапазоні частот 33-39 ГГц. У макеті генератора зі здвоєною стрічковою системою пускові струми склали 5-8 мА в діапазоні високих напруг 1,4-1,75 кВ.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: здвоєні системи, що сповільнюють рух хвиль, багатоступеневі системи, гібридні коливання, опір зв'язку поверхневої хвилі зі стрічковим пучком, зниження пускового струму, синфазний та протифазний режим коливаль, ЛЗХ-клінотрон.

This paper describes the main operating regimes of BWO-clinotrons with doubled and multistage slow-wave structures. The interaction of ribbon electron beam with the surface waves of the double-ladder and double-grating slow-wave structures in rectangular waveguides is described. The high interaction impedance and narrow band-width are inherent to symmetric operating mode of double-grating rectangular waveguide. The comparison of the double-grating and double-ladder slow-wave structures shows that latest ones has some reduced coupling impedance and wide operating frequency band. According to performed theoretical simulation the two experimental oscillators with double slow-wave structures were developed and manufactured. The efficient generation of electromagnetic oscillations is observed at 33-39 GHz. The start current 5-8 mA at beam voltage 1.4-1.75 kV is observed in the oscillator with double-ladder slow-wave structure.

KEY WORDS: double slow-wave structure, multistage slow-wave structure, hybrid modes, coupling impedance of surface wave with ribbon electron beam, start current decrease, symmetric and anti-symmetric oscillation modes, BWO-clinotron.

В настоящее время при разработке компактных вакуумных приборов в субмиллиметровом диапазоне основное внимание уделяют проблеме генерации (усиления) колебаний в широком диапазоне частот с уровнями выходной мощности 0,01–1 Вт [1-3]. Развитие приборов, основанных на индуцированном излучении Вавилова-Черенкова, в субмиллиметровом диапазоне сдерживается различными технологическими и физическими ограничениями. Однако в настоящее время, с технологической точки зрения, вполне достижимым является создание мелкоструктурных элементов

замедляющих систем (ЗС), пригодных для работы в диапазоне до 2 ТГц [1,4]. К основным физическим ограничениям относят возрастающие с частотой ВЧ омические потери, и уменьшение локализации ВЧ поля вблизи электродинамической системы. При этом рост плотности тока электронного пучка (ЭП) может в некоторой степени скомпенсировать влияние данных эффектов. Необходимо отметить, что в приборах субмиллиметрового диапазона предпочтительным считается использование ленточных электронных потоков [4,5]. Это объясняется тем, что при равных значениях плотности тока и толщины пучка, цилиндрический поток не может обеспечить такое же количество носителей заряда в своем объеме, как ленточный поток. В результате мощность, подводимая к электродинамической системе цилиндрическим ЭП в несколько раз меньше, чем при использовании ленточных потоков. Повышение плотности тока электронного пучка приводит к росту температурной нагрузки на элементы ЗС. В результате необходимым является эффективное охлаждение элементов электродинамической системы прибора, что в большинстве случаев сложно реализовать на практике.

Исходя из вышесказанного, актуальной задачей является разработка новых или оптимизация уже известных ЗС, для работы в субмиллиметровом диапазоне, обладающих широкой полосой пропускания, высоким сопротивлением связи и низкими потерями. Наибольшей полосой пропускания (20 – 30%) и минимальными ВЧ омическими потерями обладают ЗС типа меандр, встречные штыри и их модификации. При этом ЗС типа плоская гребенка и связанные резонаторы обеспечивают большее сопротивление связи при полосе перестройки 10 – 15% [4,5].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СДВОЕННЫХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Для обеспечения большего сопротивления связи поверхностной волны с ЭП, при широкой полосе перестройки, в некоторых случаях создают сдвоенные замедляющие системы (СЗС). Наиболее распространенным типом СЗС является сдвоенная плоская гребенка [4,6]. Основные геометрические параметры такой системы показаны на рис. 1. Расчет характеристик сдвоенных плоских гребенок удобнее всего проводить электродинамическим методом частичных областей [7,8].

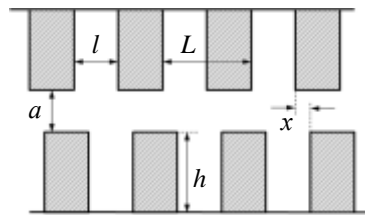


Рис. 1. Геометрия сдвоенной замедляющей системы типа плоская гребенка.

При рассмотрении систем с произвольным сдвигом x возможно использование дисперсионного уравнения, полученного в [7]. Уравнение достаточно точно описывает дисперсионную характеристику, и показывают существование двух основных типов колебаний СЗС – синфазный и противофазный. Первый характеризуется большим сопротивлением связи и узкой полосой пропускания. Противофазный режим наоборот, обладает широкой полосой пропускания, однако связь с электронным потоком в таком случае практически отсутствует.

На рис. 2 приведены результаты расчета дисперсионной характеристики СЗС в зависимости от фазового угла сдвига θ на период системы. Предполагается, что СЗС обладает следующими геометрическими параметрами: $h = 1,84$ мм, $L = 0,6$ мм, $l = 0,3$ мм, $a = 0,2$ мм. Линии пучка, изображенные на рисунке тонкими линиями, отвечают двум фиксированным значениям скорости электронного потока V_{e1} и V_{e2} , взаимодействующего соответственно с -1 и $+1$ пространственной гармоникой. Также на рис. 2 приведены расчетные значения сопротивления связи для двух видов колебаний -1 пространственной гармоники сдвоенной плоской гребенки при двух крайних значениях сдвига x . Следует отметить, что из-за большого значения сопротивления связи (более 5 кОм) на графике отсутствует характеристика соответствующая синфазному виду колебаний при $x = 0$. На рис. 3 приведена дисперсионная характеристика и сопротивление связи синфазного и противофазного вида колебаний СЗС типа плоская гребенка 0,8-мм диапазона. Система обладает следующими параметрами: $h = 0,16$ мм, $L = 0,082$ мм, $l = 0,041$ мм, $a = 0,1$ мм. В качестве сравнения, на рис. 2 и рис. 3 приводятся расчетное сопротивление связи -1 пространственной гармоники одиночных плоских гребенок с экраном, обладающих геометрическими параметрами, аналогичным параметрам сдвоенных гребенчатых систем. При укорочении рабочей длины волны, различия между дисперсионными характеристиками и сопротивлением связи сдвоенных гребенчатых систем, отличающихся значением x , становятся незначительными. При этом сохраняется высокое значение сопротивлением связи -1 пространственной гармоникой синфазного вида колебаний СЗС по сравнению с -1 пространственной гармоникой одиночной плоской гребенкой с экраном.

Визуализация электрической компоненты поля, полученная в ходе моделирования сдвоенных плоских гребенок в коде Poisson Superfish [9], приведена на рис. 4. Ось z соответствует направлению движения электронного потока в вакуумном приборе. При росте параметра x продольная составляющая вектора электрического поля увеличивается, что приводит к росту сопротивления связи противофазного вида колебаний.

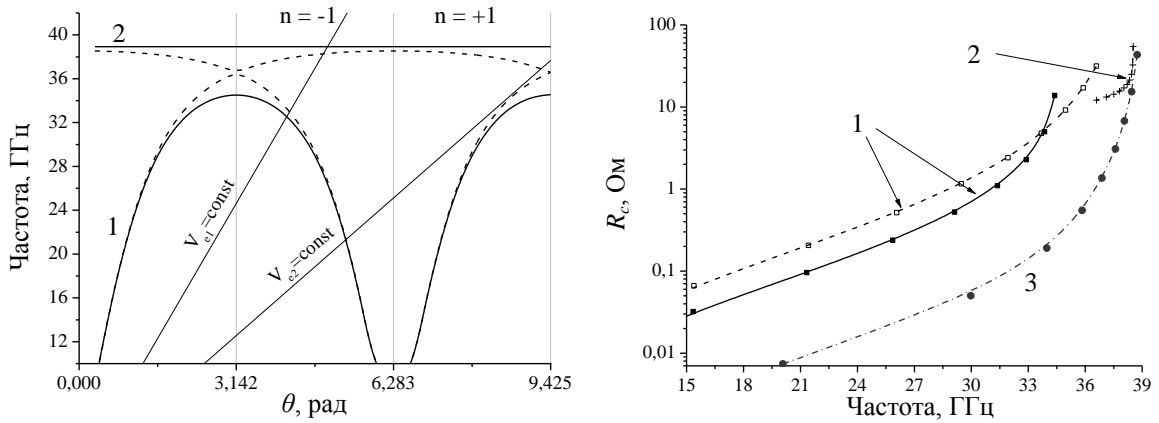


Рис. 2. Дисперсионная характеристика (слева) и сопротивление связи (справа) сдвоенной плоской гребенки 8-мм диапазона (1—противофазный вид колебаний, 2—синфазный вид колебаний, 3—плоская гребенка с экраном: $a = 0,8$ мм) при $x = 0$ (сплошная) и $x = l$ (штриховая).

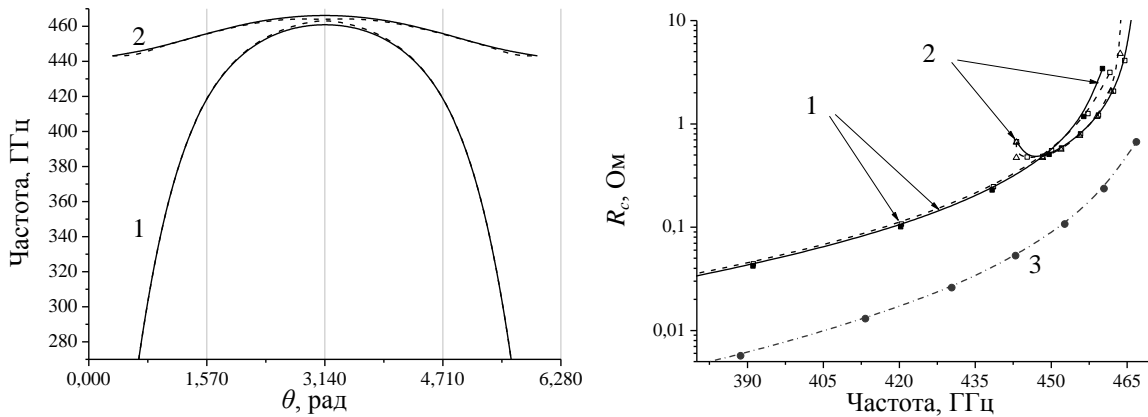


Рис. 3. Дисперсионная характеристика (слева) и сопротивление связи (справа) сдвоенной плоской гребенки 0,8-мм диапазона (1—противофазный вид колебаний, 2—синфазный вид колебаний, 3—плоская гребенка с экраном: $a = 0,8$ мм) при $x = 0$ (сплошная) и $x = l$ (штриховая).

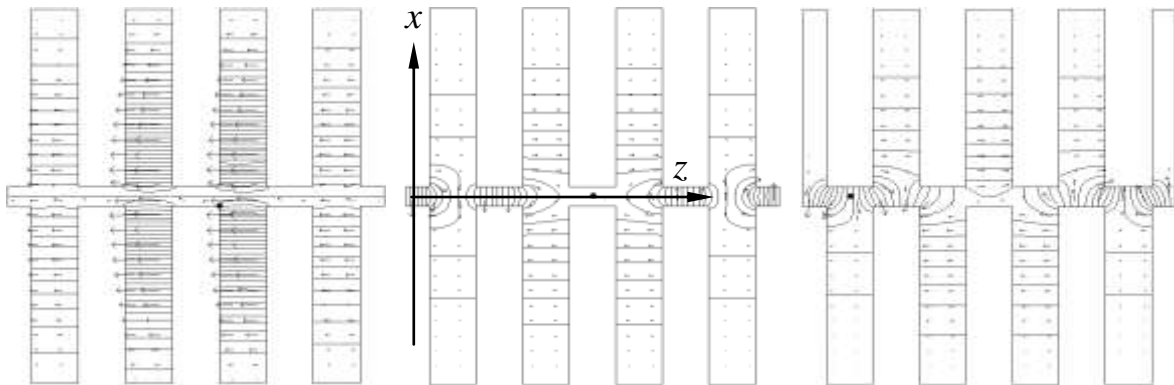


Рис. 4. Распределение электрического поля синфазного (слева) и противофазного видов колебаний сдвоенной плоской гребенки 8-мм диапазона при $x = 0$ (посередине) и $x = l$ (справа).

В настоящее время двойные плоские гребенки с относительным сдвигом l являются перспективным при разработке ЛБВ субмиллиметрового диапазона. Так как работа в таких приборах осуществляется на положительной гармонике противофазного вида колебаний (рис. 2), то изменением геометрических параметров системы удастся обеспечить постоянное замедление в широком частотном диапазоне [10]. При этом увеличивается связь замедленной волны с электронным потоком, а также практически исключается возбуждение электродинамической системы в синфазном режиме. Работа аналогичных вакуумных приборов на противофазном виде колебаний в режиме ЛОВ представляется не целесообразным, так как возникает возможность конкуренции колебаний с последующим возбуждением синфазного режима (рис. 2).

С другой стороны, система двойных плоских гребенок без сдвига x обладает наибольшим сопротивлением связи при возбуждении синфазного вида колебаний. Таким образом, данный режим является наиболее перспективным для ЛОВ генераторов. В этом случае создается возможность возбуждения электродинамической системы генератора при низких значениях стартовых токов. При этом наблюдается некоторое сходство ЛОВ с СЗС и клистронов с распределенным взаимодействием. Недостатком синфазного режима колебаний является узкая полоса его частотной перестройки, однако ее величина сравнима с перестройкой гиромонотронов в пределах одной моды.

Для расширения полосы пропускания синфазного вида колебания двойной системы возможно применение лестничных ЗС в генераторах на резонаторе поверхностной волны [11]. В настоящее время интерес к лестничным системам обусловлен возможностью создания миниатюрных клистронов с распределенным взаимодействием в субмиллиметровом диапазоне. Планируется создание компактных источников в диапазоне частот до 700 ГГц и выходной мощностью до 0,1 Вт в постоянном режиме работы [1].

В данной работе рассматривается двойная лестничная ЗС, расположенная в прямоугольном волноводе сечением $5,5 \times 8,2 \text{ мм}^2$. Толщина одной ленточки $t = 0,15 \text{ мм}$. Ширина щели равна $h = 4 \text{ мм}$, период $L = 0,6 \text{ мм}$, длина щели $l = 0,3 \text{ мм}$. Лестницы располагаются на расстоянии $a = 0,2 \text{ мм}$. Для сравнения проведен расчет характеристик двойной лестничной системы 1-мм диапазона с параметрами: $t = 0,1 \text{ мм}$, $h = 0,4 \text{ мм}$, $L = 0,08 \text{ мм}$, $l = 0,04 \text{ мм}$, $a = 0,1 \text{ мм}$. Дисперсионные характеристики и сопротивление связи рассмотренных систем приведены на рис. 5.

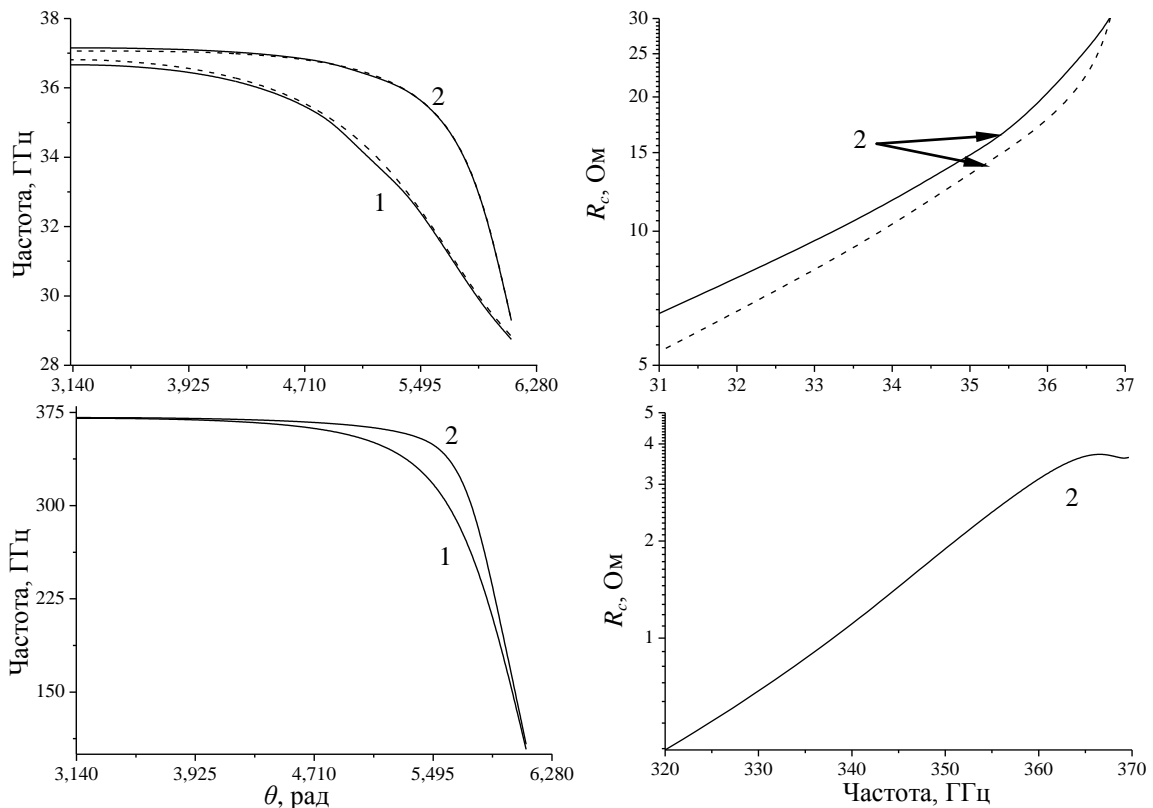


Рис. 5. Дисперсия (слева) и сопротивление связи (справа) двойных лестничных замедляющих систем в волноводе при сдвиге $x = 0$ (сплошная) и $x = l$ (штриховая) 8-мм и 1-мм диапазонов длин волн (1 – противофазный вид, 2 – синфазный вид колебаний).

Как видно из дисперсионных зависимостей, синфазный и противофазный виды колебаний обладают примерно равной и достаточно широкой полосой пропускания. Для данной геометрии эта величина составляет 25 %. При смещении лент относительно друг друга, вплоть до значения $x = l$, дисперсионная зависимость изменяется слабо, при этом наблюдается небольшое снижение сопротивления связи синфазного вида колебаний. Зависимость величины сопротивления связи от частоты приведена на рис. 5. Следует отметить, что реальное значение R_c несколько ниже расчетного.

При сравнении величин сопротивления связи сдвоенной лестничной ЗС и сдвоенной системы типа плоская гребенка видно, что сопротивление связи -1 пространственной гармоники синфазного вида колебаний сдвоенной лестничной системы уступает аналогичному виду колебаний сдвоенной системы из плоских гребенок. Однако по ширине полосы пропускания синфазный вид колебаний лестничной системы превосходит синфазный вид колебаний системы из плоских гребенок. Кроме того, СЗС лестничного типа в том же диапазоне частот превосходят по сопротивлению связи одиночные плоские гребенки с экраном. Следовательно, перспективным является применение данного типа СЗС при создании источников электромагнитных колебаний в субмиллиметровом диапазоне (рис. 3, рис. 5). Такие приборы могут обладать улучшенными рабочими характеристиками, такими как диапазон электронной перестройки, стартовые токи, выходная мощность, КПД и т.д.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОВ-ГЕНЕРАТОРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА СО СДВОЕННЫМИ ЗАМЕДЛЯЮЩИМИ СИСТЕМАМИ

Для оценки возможности снижения стартовых токов в ЛОВ-генераторах, работающих на синфазном виде колебаний сдвоенной плоской гребенки и сдвоенной лестничной ЗС, проводится экспериментальное исследование характеристик макетов генераторов с такими ЗС в 8 мм диапазоне длин волн. В качестве прототипов, были выбраны электродинамические системы, дисперсии которых приведены на рис. 2 и рис. 5.

В экспериментальном генераторе со сдвоенной плоской гребенкой используется диодная электронная пушка, изображенная на рис. 6. В данной конструкции применяется металлопористый камерный катод (L -катод), который состоит из узла подогревателя (1), активного вещества и вольфрамовой губки (2) помещенные в молибденовый корпус. Эмитирующая поверхность закрывается маской, которая в свою очередь, крепится к медному шасси (3) с помощью керамических штырей.

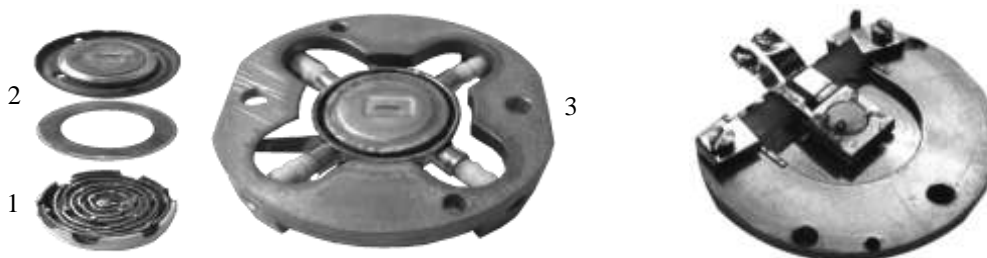


Рис. 6. Фотографии стандартной (слева) и высокоперевансной (справа) диодных электронных пушек.

Данная электронная пушка позволяет формировать ленточный электронный поток без компрессии сечением $0,2 \times 3,5 \text{ мм}^2$. Максимальная плотность тока пучка в рабочем режиме не превышает 10 А/см^2 для данной конструкции.

Низковольтный режим работы ЛОВ-генератора со сдвоенной лестничной ЗС (до 2 кВ) обуславливает необходимость повышения мощности, подводимой электронным потоком к электродинамической системе. В 8 мм диапазоне длин волн данная задача легко решается за счет увеличения тока пучка. Исходя из этого, было принято решение использовать высокоперевансную диодную электронную пушку, фотография которой приведена на рис. 6 (справа). В пушке применен импрегнированный барий-оксидный катод, обеспечивающий эмиссию электронного потока с плотностью тока порядка 20 А/см^2 . Кроме того, импрегнированные катоды позволяют понизить мощность, потребляемую от источника питания. Вольтамперные характеристики электронных пушек, примененных в экспериментальных генераторах с СЗС, приведены на рис. 7. Фокусировка электронного потока осуществляется в однородном магнитном поле с индукцией $0,5 \text{ Т}$, которое создается в зазоре величиной 35 мм лабораторной магнитной системы.

Исследование характеристик генераторов производилось на стенде, блок-схема которого приведена на рис. 8. Также, на данном рисунке схематически показана конструкция ЛОВ-генератора со СЗС типа плоская гребенка (1). Детектирование сигнала производилось в двухполупериодном режиме развертки ускоряющего напряжения, через волноводный вывод энергии прибора. В качестве детектора применен кремниевый точечный СВЧ диод Д404 (4), помещенный в одно из плеч направленного ответвителя (2).

Измерение длины волны и мощности генерируемых колебаний производилось в непрерывном режиме, при стабильности высоковольтного источника напряжения ~ 5 мВ. В качестве измерителя длины волны колебаний, применяется калиброванный камерный волномер (3) 8 мм диапазона. Измерение мощности генерируемых колебаний осуществлялось болометрическим методом при помощи калиброванного измерителя мощности (6).

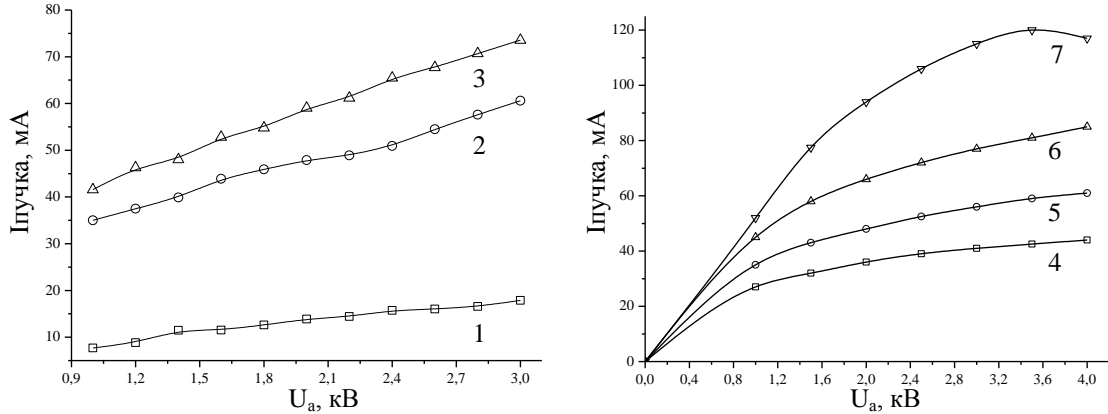


Рис. 7. Вольтамперные характеристики стандартной (слева) и высокопереванной (справа) диодных электронных пушек при различной мощности накала.
(1 – 33,6 Вт, 2 – 46,9 Вт, 3 – 52,2 Вт; 4 – 6,37 Вт, 5 – 6,76 Вт, 6 – 7,36 Вт, 7 – 8,26 Вт).

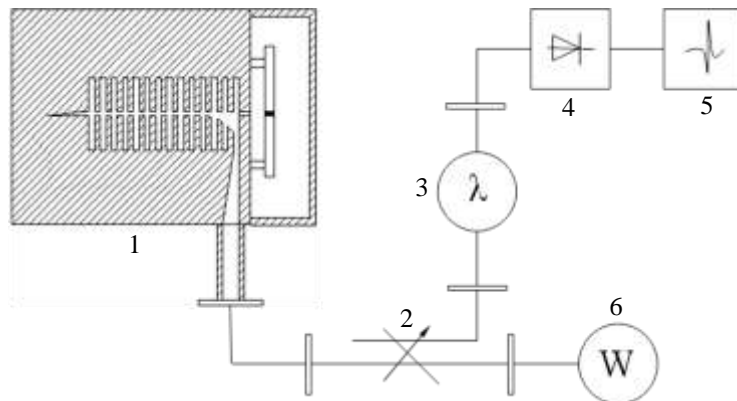


Рис. 8. Блок-схема экспериментальной установки.
(1 – генератор, 2 – направленный ответвитель, 3 – волномер, 4 – детектор, 5 – осциллограф, 6 – ваттметр)

Генератор со сдвоенной плоской гребенкой возбуждался на -1 пространственной гармонике синфазного вида колебаний электродинамической системы, в диапазоне ускоряющих напряжений 2,3 – 2,8 кВ. При этом значения стартовых токов составили порядка 15 – 20 мА. В данном диапазоне напряжений перестройка генератора по частоте производилась от 38,98 до 39 ГГц. На рис. 9 показаны диапазон электронной перестройки и величины стартового тока экспериментального генератора. Выходная мощность в зонах генерации составила до 5 Вт при значении рабочего тока порядка 60 мА.

Приведенные характеристики экспериментального генератора с СЗС типа плоская гребенка показывают, что работа в синфазном режиме колебаний позволяет уменьшить стартовые токи, по сравнению с аналогичными ЛОВ-клинофонами 8 мм диапазона. С целью дальнейшего повышения уровня выходной мощности колебаний, генерируемых экспериментальным источником, возможно проведение оптимизации волноводного вывода энергии в рабочем диапазоне частот [12].

Схематическое изображение конструкции ЛОВ-генератора со сдвоенной лестничной ЗС приведено на рис. 10. Конструктивно генератор состоит из корпуса (1), в котором помещена высокопереванная диодная электронная пушка (2), резонатора (3), в котором размещается сдвоенная лестничная ЗС (4), и волноводного вывода энергии (5). ЗС изготавливается методом фотолитографии. Общий вид изготовленной системы, а также основные узлы генератора представлены на рис. 11. В результате экспериментальных исследований характеристик генератора со сдвоенной лестничной ЗС были получены зависимость частоты генерируемых колебаний от ускоряющего напряжения и пусковая характеристика генератора (рис. 12).

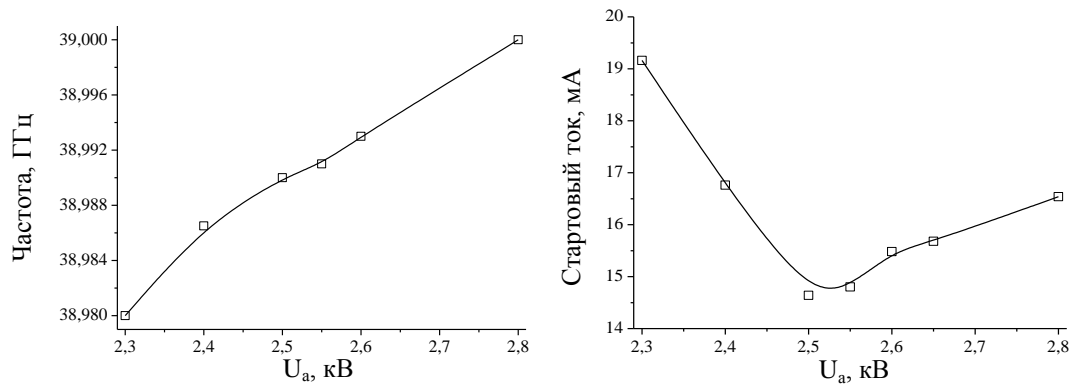


Рис. 9. Диапазон электронной перестройки частоты (слева) и зависимость пускового тока ЛОВ-генератора со двоянной плоской гребенкой при перестройке по ускоряющему напряжению (справа).

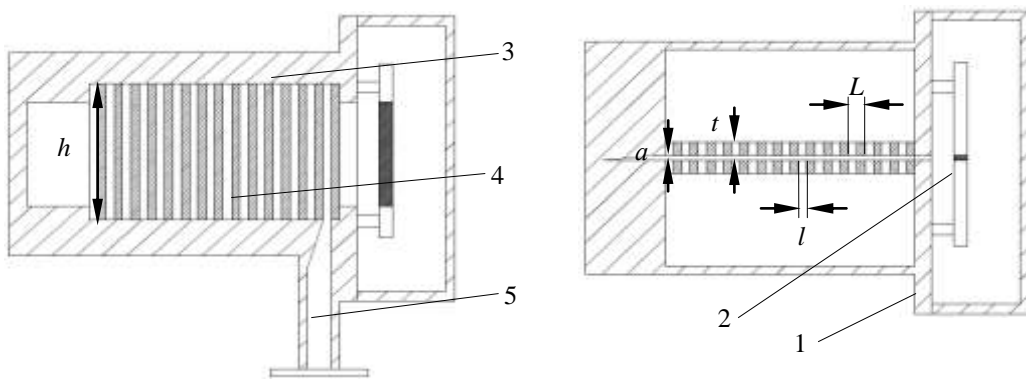


Рис. 10. Конструкция ЛОВ-генератора с СЗС лестничного типа

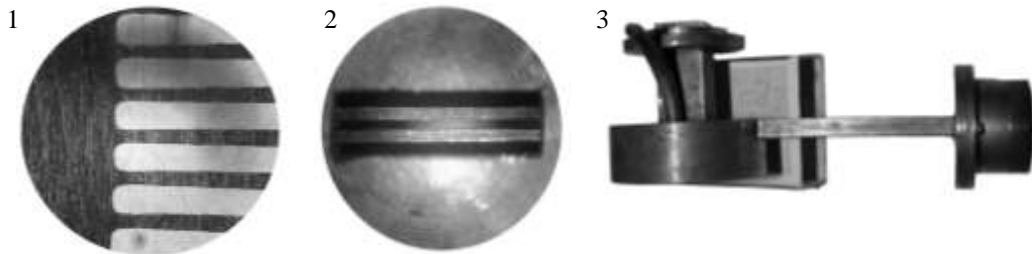


Рис. 11. Основные узлы ЛОВ-генератора с СЗС лестничного типа (1 – замедляющая система, 2 – вид установленной СЗС со стороны электронной пушки, 3 – корпус генератора перед установкой ЭОС).

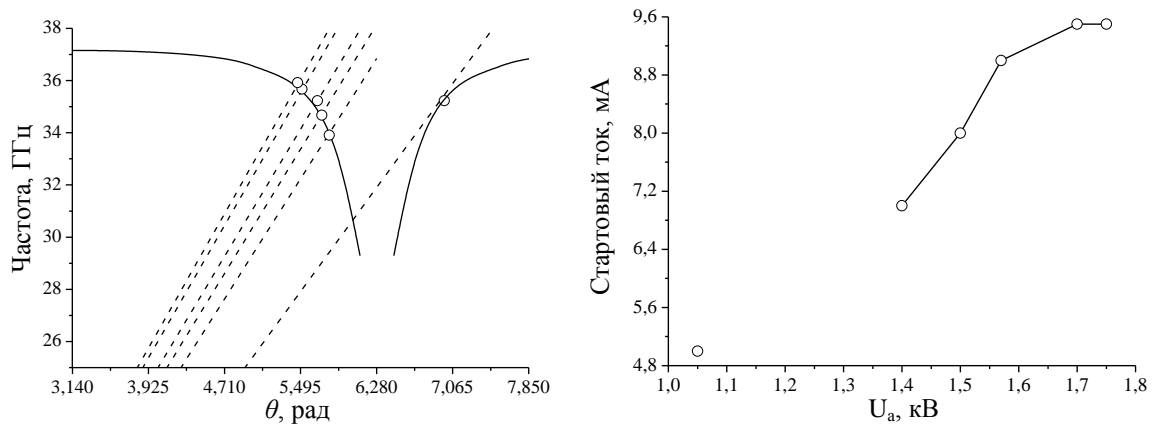


Рис. 12. Зоны генерации ЛОВ-генератора со двоянной лестничной замедляющей системой (слева) и зависимость пускового тока от ускоряющего напряжения (справа).

Для сопоставления результатов теоретического расчета с экспериментальными данными, на рис. 12 также приводится дисперсионная зависимость -1 и $+1$ пространственных гармоник синфазного вида колебаний двоянной лестничной системы. Штриховыми линиями обозначаются линии, соответствующие постоянным скоростям электронного потока. Точками обозначены зоны генерации экспериментального генератора. Как видно из характеристики, генератор возбуждается на -1 синфазной гармонике в диапазоне ускоряющих напряжений от 1,4 до 1,75 кВ. Перестройка генератора по частоте осуществлялась в диапазоне частот от 33 до 36 ГГц. При этом в полосе перестройки стартовые токи не превышают 10 мА.

Выбранный рабочий частотный диапазон генератора характеризуется слабым затуханием волны, бегущей вдоль ЗС. При нарушении согласования ЗС, на ее концах могут возникнуть отраженные волны, которые в свою очередь способны создать дополнительную цепь обратной связи по отраженной волне, и тем самым привести к резонансному возбуждению электродинамической системы генератора. Как показано в [13-15], в зонах резонансного возбуждения наблюдается снижение стартовых токов. Таким образом, необходимо выяснить, какой вклад в снижение стартовых токов вносят эффекты увеличения сопротивления связи и образования стоячей волны.

Для оценки влияния отражений на работу генератора было проведено экспериментальное измерение частотной характеристики КСВН электродинамической системы генератора при помощи панорамного измерителя КСВН Р2-65 и индикатора Я2Р-67. Измерения КСВН проводятся по схеме рефлектометра [16], в режиме качания частоты генератора в диапазоне от 33 до 38 ГГц. Неравномерность калибровочной кривой при измерениях была не более 0,4 дБ. Результаты измерений представлены на рис. 13.

В режиме согласования отраженная волна отсутствует и $КСВН = 1$, при этом коэффициент отражения равен 0. При появлении отраженной волны значение КСВН возрастает. В [12] показано, что при КСВН порядка 2 – 3, обратная связь по отраженной волне слабо влияет на частотную характеристику и зависимость стартового тока в диапазоне перестройки генератора. Дальнейший рост коэффициента отражений приводит к резонансному возбуждению электродинамической системы. В генераторе устанавливается стоячая волна с добротностью порядка нескольких десятков [15,17]. В результате образуются разрывы в частотной характеристике, а также нарушается монотонность зависимости стартового тока.

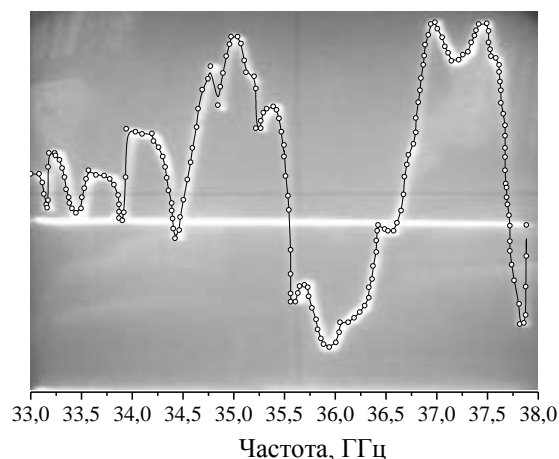


Рис. 13. КСВН электродинамической системы ЛОВ-генератора с СЗС лестничного типа (линия электронного визира соответствует $КСВН = 3$).

На рис. 13 видно, что в диапазоне частот 35,5 – 36,5 ГГц наблюдается малые отражения от электродинамической системы генератора. Минимальное значение КСВН соответствует 1,6, а стартовые токи генератора не превышают 9 – 10 мА. В этом случае можно исключить влияние отраженных волн на величину стартового тока, и говорить о преобладании в этом процессе сопротивления связи. На частотах 33,9 ГГц, и 34,7 ГГц КСВН достигает больших величин (до 3,9), что и объясняет небольшие стартовые токи порядка 7 – 8 мА. В этом случае в механизме снижения стартового тока участвуют оба эффекта.

При исследовании рабочих характеристик было также обнаружено возбуждение электродинамической системы генератора на $+1$ синфазной гармонике при ускоряющем напряжении 1 кВ и стартовом токе порядка 5 мА. В данном диапазоне частот значение КСВН достигает 5,5 – 6. Таким образом, работу генератора на положительной гармонике можно объяснить преобладанием обратной

связи по волне, отраженной от коллекторного конца генератора, над обратной связью по электронному потоку.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КЛИНОТРОНА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ТРЕХСТУПЕНЧАТОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ ТИПА ПЛОСКАЯ ГРЕБЕНКА В РЕЖИМЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Многоступенчатые системы типа плоской гребенки получили широкое распространение в электронике СВЧ в качестве ЗС магнетронов. Благодаря наличию собственных быстрых волн, способных распространяться вдоль поверхности системы и одновременно излучаться в свободное пространство, многоступенчатые плоские гребенки нашли применение в антенной технике [18]. Присутствие быстрых гармоник в собственных волнах многоступенчатых систем без экрана объясняется разделением дисперсионной характеристики однородной системы на несколько составляющих, количество которых определяется числом ступеней. При этом нулевые гармоники составляющих при определенных значениях сдвига фазы колебаний на период системы обладают фазовой скоростью больше c . Кроме плоской гребенки к многоступенчатым системам относят двухзаходную спираль, встечно-штыревые системы, а также СЗС (например, рассмотренные выше двоянные плоские гребенки и двоянные лестничные системы) [19].

Способность собственных колебаний многоступенчатых плоских гребенок без экрана излучать часть энергии при распространении вдоль системы была использована в ИРЭ НАН Украины для реализации клинотронов с распределенным квазиоптическим выводом [20]. Исследованию многоступенчатых плоских гребенок, помещенных в закрытый призматический резонатор клинотрона, посвящены работы [21]. В частности показано, что увеличение расстояния между поверхностью гребенки и отражающим экраном приводит к уменьшению низкочастотной границы зоны Бриллюэна объемных колебаний волноведущей системы с многоступенчатой структурой. Таким образом становится возможным взаимодействие объемных колебаний с симметричными составляющими, в результате чего образуются так называемые объемно-поверхностные (гибридные) колебания. Проведенный теоретический анализ, проведенный в работах [21] показывает, что гибридные колебания характеризуются большим сопротивлением связи по сравнению с объемными колебаниями, и меньшими омическими потерями в сравнении с поверхностными колебаниями.

Для исследования объемно-поверхностных колебаний был разработан макет клинотрона с трехступенчатой плоской гребенкой в 3 мм диапазоне рабочих длин волн. ЗС изготовлена электроискровым методом. Конструкция генератора и вид ЗС приведены на рис. 14. ЗС обладает периодом $L = 0,84$ мм, глубиной резонаторов $h = 0,6$ мм, $h_3 = 0,78$ мм.

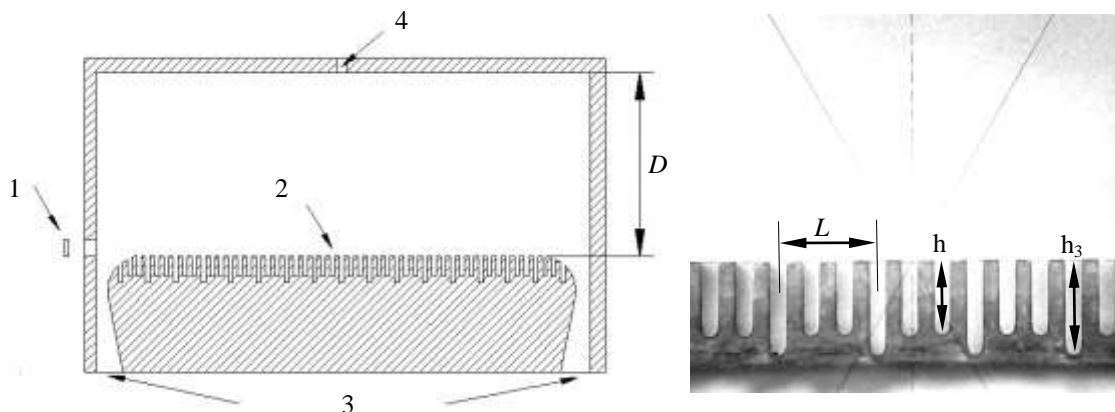


Рис. 14. Конструкция клинотрона с трехступенчатой ЗС: 1 – электронная пушка, 2 – ЗС, 3 – волноводные выводы энергии, 4 – дифракционный вывод энергии (слева). Фотография трехступенчатой плоской гребенки (справа).

Для исследования объемно-поверхностных колебаний в конструкции генератора предусмотрена возможность изменения расстояния D между поверхностью ЗС и верхней стенкой резонатора в диапазоне 0,8 – 6 мм. ЗС разрабатывалась для работы в диапазоне ускоряющих напряжений до 5 кВ. Дисперсионная характеристика трехступенчатой системы, и базовой однородной плоской гребенки показана на рис. 15. Расчет дисперсионных характеристик проведен электродинамическим методом частичных областей [21].

На первом этапе нами исследовались характеристики генератора в режиме поверхностных колебаний, при котором величина D составляет порядка 0,8 мм. В этом случае в рассматриваемом частотном диапазоне отсутствуют объемные колебания, которые при взаимодействии с симметричными составляющими могли бы привести к возникновению «гибридных» колебаний. Дисперсионная характеристика трехступенчатой системы характеризуется резкими перегибами, в которых наблюдается рост сопротивления связи волны с электронным потоком по сравнению с однородной системой. В таких точках может наблюдаться повышение эффективности взаимодействия электронного потока с полем замедленной волны.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что значения стартовых токов, при которых наблюдалась генерация колебаний в первой полосе пропускания системы (до 81 ГГц), составили порядка 35-42 мА. Для колебаний во второй и третьей полосе пропускания, стартовые токи порядка 45-55 мА. В процессе экспериментальных исследований было установлено, что кроме ожидаемой генерации колебаний вблизи трех полос пропускания трехступенчатой плоской гребенки, наблюдалась генерация колебаний в полосе частот 89-92 ГГц (область 4 на рис. 15). Указанная область соответствует взаимодействию ЭП с -1 пространственной гармоникой поверхностной волны базовой однородной плоской гребенки, из которой была образована исследуемая трехступенчатая система.

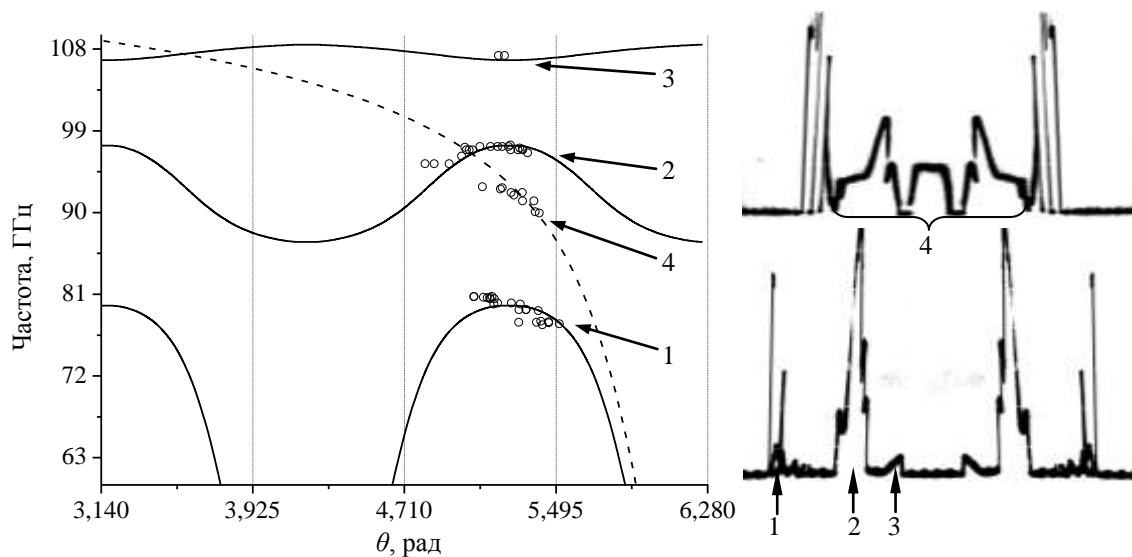


Рис. 15. Дисперсионные характеристики трехступенчатой (сплошная) и однородной (штриховая) плоской гребенки ($D = 0,8$ мм). Точками указаны экспериментальные зоны генерации прибора.

На рис. 15, справа от дисперсионной характеристики приведены осциллограммы выходного сигнала генератора, полученные в однополупериодном режиме питания ускоряющим напряжением. Цифрами указываются соответствующие зоны генерации, приведенные на дисперсионной зависимости.

В настоящее время проводятся исследования энергетических параметров излучения, как в режиме поверхностной волны, так и в режиме объемно-поверхностных волн.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены методы снижения стартовых токов и ВЧ омических потерь в лампах обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. С этой целью в качестве ЗС предлагается использование сдвоенных лестничных ЗС, сдвоенных систем типа плоская гребенка и многоступенчатых плоских гребенок. Теоретически проведен расчет дисперсионных характеристик и сопротивления связи СЗС. В качестве рабочего вида колебаний выбран синфазный вид возбуждения СЗС при нулевом относительном сдвиге. В этом случае сдвоенные системы типа плоская гребенка характеризуются большим сопротивлением связи и узкой полосой перестройки порядка 20 МГц. СЗС лестничного типа обладают большей шириной полосы пропускания, но меньшим сопротивлением связи по сравнению со сдвоенными плоскими гребенками.

Проведен теоретический расчет дисперсионной характеристики трехступенчатой плоской гребенки для работы в 3 мм диапазоне длин волн, а также определены основные режимы взаимодействия электронного потока с собственными колебаниями волноведущей структуры, нагруженной многоступенчатой ЗС. Разработана конструкция генератора с трехступенчатой ЗС, позволяющая осуществлять механическое перемещение верхней стенки призматического резонатора относительно

поверхности замедляющей системы. Проведены измерения частотных характеристик и стартового тока клинотрона в режиме поверхностных колебаний. Полученная экспериментальная дисперсионная характеристика показывает хорошее соответствие теоретическим расчетам. Экспериментально показана возможность возбуждения колебаний многоступенчатой гребенки и колебаний базовой однородной гребенки в призматическом резонаторе клинотрона, нагруженного трехступенчатой плоской гребенкой.

Экспериментально получены зависимости стартового тока и частотные характеристики генераторов со СЗС типа плоской гребенки и лестничного типа. Изучены процессы резонансного возбуждения электродинамических систем генераторов, а также определены области, в которых сопротивление связи вносит основной вклад в процесс снижения стартового тока. Сравнение полученных результатов со значениями стартового тока, характерных для ЛОВ-клинотронов 8 мм диапазона с ЗС типа плоская гребенка с экраном, показывают возможность снижения стартовых токов почти в два раза, при использовании сдвоенных лестничных ЗС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Booske J. H., et al., "Vacuum Electronic High Power Terahertz Sources" / IEEE Trans. Terahertz Science and Tech. – 2011. - Vol. 1, No. 1. - pp. 54-75.
2. Mineo M., Paoloni C., "Double Corrugation Rectangular Waveguide Slow-wave Structure for THz Vacuum Devices" / IEEE Trans. on Electron Dev. – 2010. - Vol. 57, No. 11. - pp. 3169-3174.
3. Bhattacharje S., Booske J. H., et al., "Folded Waveguide Traveling-Wave Tube Sources for Terahertz Radiation" / IEEE Trans. on Plasma Science. – 2004. - Vol. 32, No. 3. - pp. 1002-1014.
4. Young-Min Shin, Jinfeng Zhao, Barnett L. R., Luhmann N. C. Jr., "Investigation of Terahertz Sheet Beam Traveling Wave Tube Amplifier with Nanocomposite Cathode" / Physics of plasmas. – 2010. - Vol. 17. - pp. 123105.1-123105.4.
5. Guo Liu, Wenlong He, Cross A. W., Huabi Yin, Bowes D., "Simulation of a G-band sheet beam backward wave oscillator with double staggered metallic rod array" / J. Phys. D: Appl. Phys. – 2013. - Vol. 46. - pp. 345102.1-345102.7.
6. Qing-Lun Liu, Zi-Cheng Wang, Pu-Kun Liu, Chao-Hai Du, Hai-Qiang Li, An-Yu Xu, "A THz Backward-Wave Oscillator Based on a Double-Grating Rectangular Waveguide" / IEEE Trans. on Electron Dev. – 2013. - Vol. 60, No. 4. - pp. 1463-1468.
7. Ю. Г. Альтшулер, А. С. Татаренко, *Лампы малой мощности с обратной волной*. Москва: Сов. Радио. – 1963. – 296 с.
8. E.M. Marshall, J.E. Walsh, E.J. Pirce, J.A. Jackson, "Dispersion relations for metal grating loaded resonators" / International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1990. – Vol. 11, No. 10. – pp. 1189-1224.
9. <http://www.lanl.gov/projects/feynman-center/technologies/software/poisson-superfish.php>
10. Young-Min Shin, L. R. Barnett, N. C. Luhmann, "Phase-shifted traveling-wave-tube circuit for ultrawideband high-power submillimeter-wave generation" / IEEE Trans. on Electron Dev. – 2009. - Vol. 56, No. 5. - pp. 706-712.
11. Касьянов А. П., Ефимов Б. П., Коротун Л. И., Кривицкий Б. Я., "Генератор с лестничной периодической структурой в волноводе" / Электрон. техника. серия 1. Электрон. СВЧ. – 1972. – № 8. – с. 121-122.
12. Г. Я. Левин, А. И. Бородин, А. Я. Кириченко и др., *Клинотрон*. Киев: Наукова Думка. – 1992. – 157 с.
13. Ефимов Б. П., Кириченко А. Я., Бужинский А. П., "Экспериментальное исследование влияния отражений на частотные характеристики ЛОВ миллиметрового диапазона" / Тр. ИРЭ АН УССР. – 1967. – № 15. – с. 141-157.
14. Г. Я. Левин, А. И. Бородин, А. Я. Кириченко и др., *Клинотрон*. Киев: Наукова Думка. – 1992. – 157 с.
15. Ваврин Д. М., "Теория клинотрона" / Радиофизика и Электроника. – 2007. – Т. 12, спец. вып. – с. 35-47.
16. А. М. Чернушенко, А. В. Майбородин, *Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазонов волн*. Москва: Радио и Связь. – 1986. – 336 с.
17. Лысенко Е. Е., Пишко О. Ф., Чумак В. Г., Чурилова С. А., "Добротность резонансной линии клинотронов миллиметрового диапазона" / Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – Т. 6, № 4. – с. 317-322.
18. V.V. Noblyk, "Coupled-mode theory" / Proceedings of the IEEE. – 1991. – Vol. 79, No. 10. – pp. 92-97.
19. Р. А. Силин, В. П. Сазонов, *Замедляющие системы*. Москва: Сов. Радио. – 1966. – 632 с.
20. Е.Е. Лысенко, О.Ф. Пишко, С.А. Чурилова, "Экспериментальные исследования клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии" / Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, № 1. – с. 13-19.
21. Хугорян Э. М., Пономаренко С. С., Кишко С. А., Кулешов А. Н., Лукин К. А., 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.