

УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ С НАКЛОННЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПОТОКОМ

В. Д. Ерёмка

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: yeryomka@ire.kharkov.ua*

В последние годы диапазон терагерцевых (ТГц) частот вызывает повышенный интерес, что проявляется в росте числа публикаций в научной литературе. В статье обсуждаются возможности применения принципа умножения частоты при построении вакуумных источников электромагнитного излучения с наклонным электронным потоком в коротковолновых диапазонах, в том числе и в диапазоне ТГц. Описаны результаты моделирования и экспериментального исследования умножителей частоты миллиметрового диапазона, в частности умножительных клинотронов, умножительных оротронов и умножительных орботронов с высокими коэффициентами умножения частоты $k_f = 15$. Описаны результаты экспериментального исследования умножителя частоты миллиметрового диапазона, каскадом отбора мощности которого служит электродинамическая система в виде призматического резонатора с периодической структурой типа "гребенка". Электродинамическая система возбуждалась на высших типах колебаний. Показана возможность работы каскада отбора мощности такого умножителя в диапазоне частот, который значительно превышает октаву, что обеспечивает коэффициент преобразования частоты больше 10. Приведены энергетические и частотные характеристики умножителей частоты. Экспериментально подтверждена перспективность применения описанных схем построения для создания источников электромагнитного излучения с перестройкой частоты в диапазоне ТГц. Ил. 25. Табл. 3. Библиогр.: 56 назв.

Ключевые слова: клинотрон, оротрон, орботрон, умножители частоты, миллиметровый диапазон волн, диапазон терагерц.

С начала 1960-х гг. в ряде стран осуществляются разработки и исследования вакуумных источников когерентных электромагнитных колебаний с нерелятивистскими энергиями электронов с целью освоения диапазонов гигагерцевых (ГГц) и терагерцевых (ТГц) колебаний [1-56].

Диапазоном ТГц колебаний (рис. 1) в литературе называют интервал частот 0,10 - 10,0 ТГц

[6]. Проблемы генерации, усиления и преобразования на частотах диапазона ТГц являются одними из самых трудных в современной радиофизике и физической электронике. Диапазон ТГц частот оказался трудным для освоения вакуумными приборами с нерелятивистскими электронными потоками, полупроводниковыми и квантовыми приборами.

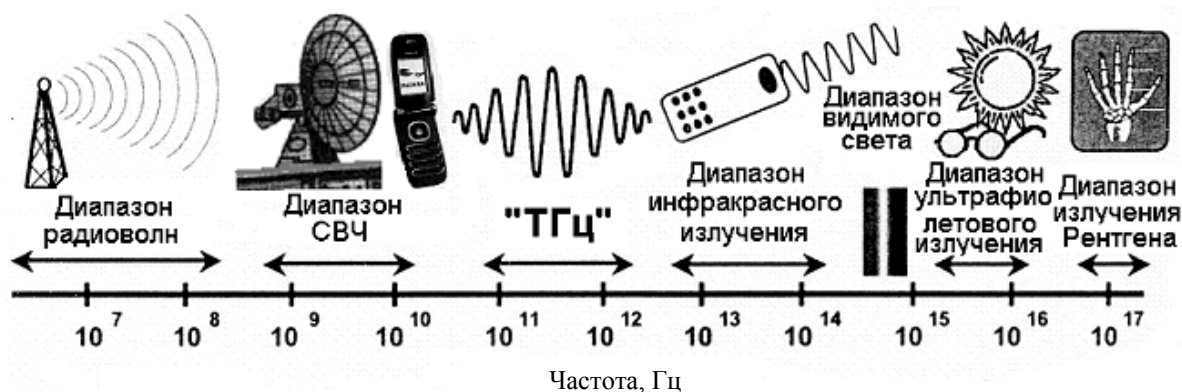


Рис. 1. Спектр электромагнитных колебаний

Источники когерентного электромагнитного излучения в интервале частот 0,1 - 10,0 ТГц требуются, в частности, в спектроскопии субмиллиметрового диапазона, субмиллиметровой радиоастрономии, при создании радаров с высоким разрешением, в линиях связи между сверхбыстродействующими компьютерами, в ТГц устройствах обнаружения химических и биологических реагентов [6-8].

Такие источники должны обеспечивать генерирование выходного сигнала требуемой мощно-

сти и плавную перестройку частоты вблизи заданных рабочих точек в указанном интервале. Процесс разработки электровакуумных генераторов ТГц диапазона с плавной перестройкой частоты выходного сигнала не завершен. Особенно трудным для освоения такими генераторами остается интервал частот 1,5 - 3,0 ТГц. Освоение области вблизи 3,0 ТГц источниками когерентного электромагнитного излучения - оптическими лазерами с накачкой сопряжено с большими трудностями. КПД лазеров с накачкой ограничен условиями Мэнли - Роу [13].

Первые физические опыты в области ТГц частот относятся к 1920 г., когда американские естествоиспытатели Никольс и Тир с помощью искрового генератора получили колебания с частотой 1,363 ТГц [5]. В 1924 г. А. А. Аркадьева-Глаголева начала свои обширные исследования на частотах диапазона ТГц, применяя предложенный ею, так называемый, массовый облучатель, в котором металлические частицы в масле направлялись с помощью вращающегося колеса в область разрядника [5]. В процессе этих исследований, продолжавшихся до 1943 г., наиболее высокой измеренной частотой была частота 2,325 ТГц.

В 1950-60-х гг. во Франции (Thomson-CSF-P. Guenard, O. Doehler, V. Epsztein, R. Warncke) [9] и РСФСР (Корпорация "Исток" - Н. Д. Девятков, М. Б. Голант, А. А. Негирев, В. С. Савельев) [11] были созданы маломощные широкодиапазонные генераторы - лампы обратной волны - карсинотроны (ЛОВ О-типа) на частотах диапазона ТГц с выходной мощностью единицы - десятки милливольт. В ЛОВО карсинотронах имеет место распределенное взаимодействие электронов с замедленными волнами периодических замедляющих систем (ЗС), которое обеспечивает передачу определенной части энергии заряженных частиц высокочастотному полю. Амплитуда первой отрицательной пространственной гармоники электромагнитной волны, распространяющейся вдоль периодической ЗС при удалении от её рабочей поверхности, экспоненциально затухает. Вследствие этого распределенное взаимодействие электронов и волн в ЛОВО карсинотронах осуществляется с неоднородным по толщине пучка высокочастотным полем. При наличии пульсаций и обедненного слоя в сформированном электронном потоке, а также слабого импеданса связи поля волн пространственного заряда и волн электромагнитного поля первой отрицательной пространственной гармоники ЗС типа "гребенка" или "встречные штыри" в диапазоне ТГц частот с укорочением рабочей длины волны выходная мощность ЛОВО карсинотронов существенно уменьшается [14,15]. В связи с этим требования уменьшения толщины электронного пучка и увеличения плотности его тока возрастают, достигая технологического предела.

Технологический предел, которого достигли характеристики традиционных ЛОВО карсинотронов диапазона ТГц, обусловлен следующими факторами:

- технологическими трудностями при изготовлении микроскопических элементов и узлов генераторов с наноразмерами их деталей;

- затруднениями, связанными с охлаждением микроскопических элементов периодической ЗС, возрастающими с укорочением длины волны;

- ростом высокочастотных (ВЧ) потерь обратно пропорционально $\sqrt{\lambda}$;

- трудностями при формировании тонких электронных потоков с большой плотностью тока, пропорциональной $\lambda^{5/2}$ [5, 10-13].

В Украине в 1956 г. в ИРЭ АН УССР Г. Я. Левиным вместе с сотрудниками была предложена и реализована ЛОВО, получившая название "клинотрон" [14]. Особенности конструкции и принцип действия ЛОВО клинотрона и характеристики достаточно полно описаны в [14] и статьях данного юбилейного номера сборника. В ЛОВО клинотронах применяют падающие под острым углом на рабочую поверхность "гребенки" более "толстые" ленточные электронные потоки, по сравнению с ленточными потоками ЛОВО карсинотронов [15,16]. Острый угол φ между плоскостью симметрии "толстого" ленточного электронного потока и плоскость замедляющей системы - "гребенки" - составляют величину $\varphi = 0,5^\circ - 6^\circ$ [14]. При этом по всей толщине ленты электронного потока существенно возрастает импеданс связи поля волн пространственного заряда (ППЗ) и волн электромагнитного поля первой отрицательной пространственной гармоники ЗС типа "гребенка", обеспечивая в непрерывном генераторном режиме выходную мощность единицы ватт - сотни милливольт [14]. Генераторные лампы ЛОВО клинотрона реализованы в интервале 0,10 - 0,545 ТГц.

Несмотря на значительный период времени, прошедший с момента проведения первых физических экспериментов в диапазоне ТГц частот, его освоение находится на пути к вершине. В интервале частот 1,363 - 10,0 ТГц до настоящего времени отсутствуют малогабаритные вакуумные генераторы электромагнитных волн с плавной перестройкой частоты выходного сигнала. В ряде лабораторий продолжается поиск технологических решений с целью создания ЛОВО карсинотронов на частотах в интервале 1,5 - 3 ТГц [17,18].

Практика показала, что диапазон эффективной работы реализованных нерелятивистских источников высокочастотного электромагнитного излучения ограничен со стороны коротких волн длиной волны 0,22 мм [11]. Что касается генерирования когерентных колебаний на частотах в интервале 1,5 - 3,0 ТГц, то в этом случае большие надежды возлагали на релятивистские электровакуумные приборы, в которых применен эффект Вавилова-Черенкова - Смита-Парселла или излучение ускоренных электронов [19,20]. Однако, вследствие невысоких значений КПД, существенных габаритов и массы устройств, ограниченных возможностей перестройки частоты выходного сигнала, релятивистские генераторы диапа-

зона ТГц остаются стационарными лабораторными агрегатами.

Значительные перспективы освоения диапазона ТГц колебаний открылись при создании мощных источников электромагнитного излучения на принципе циклотронного резонанса - мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) [21]. Однако для реализации МЦР гиротронов на частотах ТГц диапазона необходимы сверхбольшие магнитные поля. Гироприборы с технически реализуемыми магнитными полями на высоких ($n > 3$) гармониках циклотронной частоты находятся на стадии лабораторных исследований [22-27].

Вышеприведенный краткий анализ результатов разработок ЛОВО ТГц диапазона свидетельствует о том, что возможности создания малогабаритных автогенераторных ламп с нерелятивистскими энергиями электронов в интервале частот 1,5 - 3,0 ТГц ограничены. С учетом технологических и экономических факторов, для успешного решения задачи генерирования электромагнитного излучения группированными электронными потоками в интервале частот 1,5 - 10,0 ТГц с помощью вакуумных генераторов, обладающих плавной перестройкой частоты выходного сигнала, необходимо настойчиво проводить поиск новых принципов построения ламп.

В электронике принцип преобразования (умножения, деления) частоты применяют для осуществления перехода из одного частотного диапазона в другой [1-5]. В частности, умножители (делители) частоты создают тогда, когда трудно обеспечить режим автоколебаний генераторов электромагнитного излучения в требуемом частотном интервале. Гармоническое умножение частоты в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах исследуют с переменным успехом в различных нелинейных элементах. В настоящее время принцип преобразования частоты применяют при освоении диапазона ТГц колебаний [6,7]. Вероятно, применение принципа преобразования частоты и современных достижений нанотехнологии в вакуумной электронике позволит создать источники электромагнитных колебаний ТГц диапазона с плавной перестройкой частоты выходного сигнала и нерелятивистскими энергиями электронов [17].

В данной статье проведен анализ результатов моделирования и экспериментального исследования гармонического умножения частоты в нелинейных элементах в виде группированных в сгустки нерелятивистских электронных потоков, падающих на поверхность периодических ЗС под острым углом φ [3, 4, 28-33, 43-48]. Создание источников электромагнитных колебаний коротковолновых диапазонов с уровнем мощности, стабильностью колебаний и режимами питания, удовлетворяющими требованиям практического

их применения, и в настоящее время остается актуальной задачей современной электроники.

1. Принцип действия умножителей частоты. Конструкции электровакуумных умножителей частоты коротковолновых диапазонов относят к гибридным приборам СВЧ типа О, в которых осуществляется преобразование мощности и частоты. Они содержат электронно-оптическую систему (ЭОС), два каскада: каскад предварительной модуляции и группировки электронов и каскад отбора мощности от гармоник тока, а также коллектор электронов. ЭОС формирует однопучковый или многопучковый электронный поток. Модулирующий каскад и каскад отбора мощности возбуждают на разных, но кратных частотах. Как правило, они представляют собой разнесенные в пространстве колебательные контуры, конструкции которых могут отличаться. Для осуществления предварительной модуляции и группировки электронов обычно применяют тороидальные резонаторы с узкими зазорами взаимодействия или секции ЛБВО и ЛОВО [28-33, 43-48]. Каскадом отбора мощности может быть отрезок ЗС, согласованный на концах, короткозамкнутый отрезок ЗС - "распределенный резонатор" [28-31], отрезок периодической ЗС, помещенный в призматический резонатор или открытый резонатор (ОР) [32,33,43]. Модулирующий каскад умножителя, возбуждаемый сигналом от внешнего источника или в режиме автоколебаний на частоте Ω , осуществляет модуляцию заряженных частиц по скорости, которая переходит в пространстве дрейфа в модуляцию потока по плотности, при этом образуются электронные сгустки с высоким содержанием электронов и с однородной энергией. В каскаде отбора мощности осуществляется передача высокочастотному полю энергии электронов на частотах гармоник модулирующего сигнала $\omega_k = k_f \Omega$ (здесь k_f - коэффициент умножения частоты).

Протяженность периодической ЗС каскада отбора мощности должна быть достаточной. При существующем слабом импедансе связи волн поля пространственного заряда и замедленных волн электромагнитного поля ЗС в диапазоне ТГц необходимо применить распределенное взаимодействие с потоком частиц, падающим под острым углом на рабочую поверхность периодической ЗС каскада отбора мощности. При этом осуществляется передача от электронов высокочастотному полю замедленных волн значительной части энергии.

Можно выделить две причины, которые на данном этапе развития умножителей частоты коротковолновых диапазонов с нерелятивистскими электронными потоками ограничивают возможность получать высокие коэффициенты преобразования частоты и мощности. Первая причина обусловлена отсутствием в коротковолновых

диапазонах эффективных группирователей электронов однопучковых и многопучковых потоков в компактные сгустки с минимальным разбросом по скоростям. Протяженность сгустков можно определить с помощью фазовых диаграмм. Вторая причина обусловлена трудностью настройки на кратный резонанс колебательных контуров модулирующего каскада и каскада отбора мощности умножителя частоты при одном рабочем ускоряющем напряжении и при существенном укорочении длины волны генерируемых электромагнитных колебаний.

В последние годы нам удалось частично устранить ограничения, обусловленные первой причиной и полностью устранить вторую причину путем применения электродинамических систем на основе ОР, которые можно настроить на контролируемый резонанс на частоте колебаний модулирующего и выходного сигналов.

Умножители частоты с наклонными нерелятивистскими электронными потоками могут найти применение в качестве источников когерентных электромагнитных колебаний ТГц диапазона с плавной перестройкой частоты выходного сигнала при решении ряда упомянутых выше задач.

2. Умножительный клинотрон [28].

Устройство умножительного клинотрона (УМК) (рис. 2) является частным случаем реализации принципа построения гибридных приборов с гармонизированным электронным потоком [46]. Для формирования ленточного электронного потока с площадью поперечного сечения $0,4 \times 3 \text{ мм}^2$ в УМК применена асимметричная диодная ЭОС 1 с плоскопараллельными электродами, которая формирует "толстый" ленточный электронный поток 2, сфокусированный не жестко. В качестве модулирующего каскада 3 в нем применен тороидальный

клистронный резонатор, который при возбуждении ВЧ сигналом с частотой Ω , генерируемым внешним источником, обеспечивает модуляцию электронного потока 2 по скорости, переходящую в пространстве дрейфа в группировку по плотности с образованием достаточно плотных электронных сгустков.

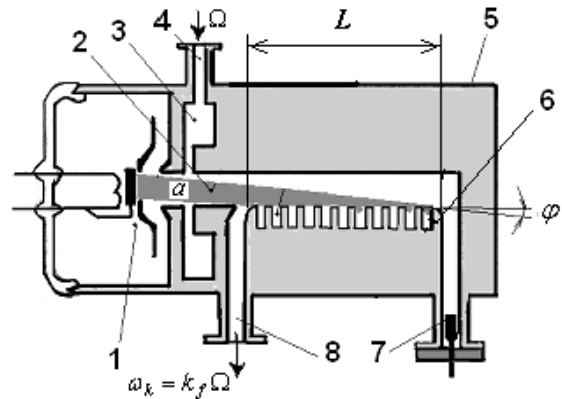


Рис. 2. Умножительный клинотрон: 1 - ЭОС; 2 - "толстый" ленточный электронный поток толщиной a ; 3 - модулятор электронов - тороидальный резонатор; 4 - ввод мощности входного сигнала на частоте Ω ; 5 - корпус; 6 - ЗС "гребенка"; 7 - подстроечный поршень; 8 - вывод энергии выходного сигнала на частоте $\omega_k = k_f \Omega$

Клистронный резонатор 3 модулирующего каскада УМК снабжен прямоугольным отверстием $3 \times 0,6 \text{ мм}$ для прохождения ленточного электронного потока, имел величину зазора взаимодействия равную $0,5 \text{ мм}$. На частоте $\Omega = 9050 \text{ ГГц}$ коэффициенты взаимодействия резонатора $M \approx 0,66$ при ускоряющем напряжении $V = 700 \text{ В}$ и $M \approx 0,9$ при $V = 2500 \text{ В}$. Параметры тороидального клистронного резонатора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрия резонатора	Рабочая длина волны λ , мм	Ширина зазора взаимодействия d , мм	Диаметр "пяточка" $2a$, мм	Диаметр резонатора $2b$, мм	Высота резонатора h , мм
	30-33	0,5	5,0	10,5	4,0

Резонатор 3 на требуемую резонансную частоту настраивали путем изменения величины емкости зазора взаимодействия с помощью механического устройства. Модулирующий сигнал от внешнего источника в тороидальный резонатор передавали посредством коаксиальной линии с петлей связи. Такой каскад 3 модуляции и группировки электронов обеспечивает зависимости изменения амплитуд гармоник тока (I_k/I_1) и их

мощностей (P_k/P_1) при изменении номера k , представленные на рис. 3.

Использование тороидального резонатора 3 в модулирующем каскаде умножителя позволяет осуществлять модуляцию ленточного электронного потока по всей его толщине и вводить в высокочастотное поле замедленной волны "гребенки", работающей в клинотронном режиме, все слои электронов. Кроме того, модулирующий кас-

кад такого типа обеспечивает эффективное управление режимом умножения, так как изменение напряжения резонатора в широком интервале значений сравнительно слабо влияет на глубину модуляции потока по скорости. Это позволяет упростить конструкцию умножителя и не вводить развязку по высокому напряжению между модулирующим каскадом и каскадом отбора мощности.

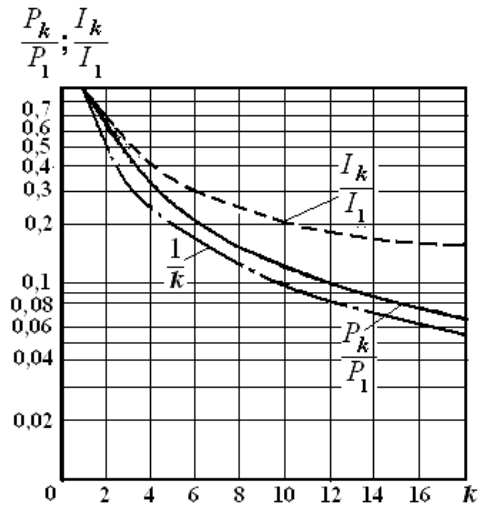


Рис. 3. Характер спада относительной величины амплитуды гармоники тока I_k/I_1 и мощности гармоники P_k/P_1 от номера гармоники k

Отбор высокочастотной энергии от гармоник тока сгруппированного в сгустки ленточного электронного потока 2 осуществляют на частотах $\omega_k = k_f \Omega$ в каскаде отбора мощности 6 в виде ЗС типа "гребенка", хорошо зарекомендовавшей себя в ЛОВО клинотронах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов [14]. Преобразование кинетической энергии электронов потока 2 в ВЧ энергию осуществляется при падении частиц под углом φ на рабочую поверхность "гребенки" 6. При падении "толстого" ленточного ЭП 2 под острым углом φ на рабочую поверхность "гребенки" 6 обеспечивается синхронное распределенное взаимодействие всех заряженных частиц с электромагнитным полем замедленной волны. Клинотронный угол φ определяется из соотношения

$$\varphi = \arctg \frac{a}{L} \quad (1)$$

где a - толщина ленточного электронного потока в миллиметрах; L - общая длина ЗС - "гребенки" в миллиметрах. Клинотронный режим возбуждения каскада отбора мощности умножителя позволяет повысить мощность его выходного сигнала за счет распределенного взаимодействия частиц по всей толщине электронной ленты, а также создает условия для повышения эффективности энергообмена между электронами и электромагнитными колебаниями субмиллиметрового диапазона. Технология изготовления ЗС типа "гребенка" в настоящее время практически освоена в интервале частот 0,1 - 1,5 ТГц.

Модулятором электронного потока в УМК может быть также периодическая ЗС. Однако в процессе экспериментов установлено, что обеспечить эффективное взаимодействие потока с двумя ЗС типа "гребенка" на кратных частотах можно только при подаче на каждую ЗС соответствующих напряжений.

Наличие в УМК каскада модуляции потока электронов на более низкой частоте практически снимает проблему обеспечения пусковых условий в каскаде отбора мощности с укорочением рабочей длины волны, которая характерна для автогенераторов типа ЛОВО карсинотрон и ЛОВО клинотрон.

С целью выяснения особенностей работы каскада отбора мощности в режиме бегущей или обратной волны, пушечный и коллекторный концы ЗС типа "гребенка" были снабжены выводами 7, 8 энергии. Кроме того, наличие двух выводов энергии позволяет управлять коэффициентами отражения от концов ЗС и определять влияние резонансных свойств "гребенки" на работу клинотронного каскада отбора мощности. "Гребенка", снабженная жидкостной системой охлаждения, обладает способностью рассеивать значительные величины мощности электронного потока. В экспериментальных образцах УМК применялись "гребенки", рассчитанные для работы в 8-, 2-мм диапазонах, что соответствует четвертой и пятнадцатой гармоникам колебаний сигнала модулирующего каскада. Основные геометрические параметры ЗС, исследованных УМК, приведены в табл. 2 [30,31].

Внешний вид умножительных клинотронов показан на рис. 4.

Таблица 2

Длина волны, мм	Шаг ЗС, мм	Глубина щелевого резонатора, мм	Ширина щелевого резонатора, мм	Ширина ЗС, мм	Длина ЗС, мм	Длина пространства дрейфа, мм
8,24	0,5	1,87	0,25	3,0	11,8	4,0
8,24	0,5	1,87	0,25	3,0	25	4,0
2,2	0,18	0,48	0,09	3,0	9,8	4,0

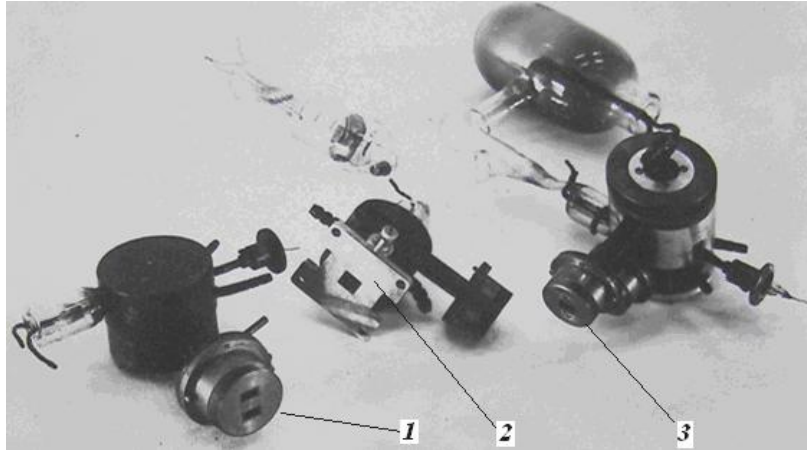


Рис. 4. Внешний вид УМК; 1 - УМК 8-мм диапазона с "гребенкой" длиной 11,8 мм; 2 - УМК 2-мм диапазона с "гребенкой" длиной 9,8 мм; 3 - УМК 8-мм диапазона с "гребенкой" длиной 25 мм

Схема измерений УМК описана в работе [30]. Для выяснения основных закономерностей работы УМК процесс умножения частоты исследован в двух режимах: с возбуждением каскада отбора мощности в режиме автоколебаний отсутствует и с возбуждением выходного каскада в клинотронном режиме.

3. Результаты экспериментальных исследований УМК [29-31]. Электрическая длина ЗС типа "гребенки" каскада отбора мощности в экспериментальном образце не превышала пятнадцати длин волн при возбуждении на первой отрицательной пространственной гармонике поля, поэтому величина рабочего тока была недостаточной для возбуждения лампы в режиме автоколебаний ЛОВО. Самовозбуждение каскада отбора мощности достигалось только посредством введения дополнительных отражений в области коллекторного и пушечного концов ЗС и превращением её в распределенный резонатор. В связи с этим при возбуждении каскада отбора мощности гармониками тока (режим умножения) величина рабочего тока УМК в несколько раз меньше стартового тока, обеспечивающего возбуждение "гребенки" в режиме автоколебаний.

Когда частота колебаний Ω источника входного сигнала совпадала с резонансной частотой тороидального резонатора модулирующего каскада, то на выходе умножителя наблюдались колебания, соответствующие четвертой гармонике $\omega_4 = 4\Omega$. Характер зависимости выходной мощности умножителя от величины ускоряющего напряжения приведен на рис. 5. Сигнал с частотой колебаний ω_4 наблюдается во всем диапазоне изменения ускоряющего напряжения. При напряжениях $V_a = 740$ В и $V_a = 3100$ В обнаружены максимумы выходной мощности УМК на частоте $\omega_4 = 36,2$ ГГц в полном согласии с дис-

персионной характеристикой "гребенки". Первый максимум соответствует взаимодействию промодулированного тороидальным резонатором по скоростям электронного потока с полем "гребенки" на плюс первой пространственной гармонике; второй максимум при напряжении $V_a = 3200$ В - взаимодействию четвертой гармоники модулированного потока с минус первой пространственной гармоникой поля ЗС. Ширина областей генераций по напряжению, вероятно, в значительной степени определяется крутизной частотно-вольтовой характеристики каскада отбора мощности. При токе макета в 30 мА ширина первой области генерации по уровню половинной мощности составляет 100 В, а второй при рабочем токе 60 мА превышает 500 В.

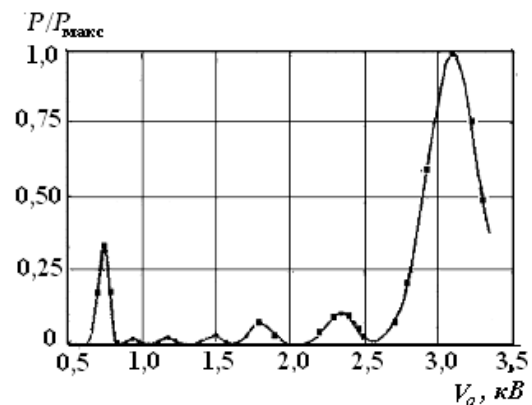


Рис. 5. Зависимость выходной мощности УМК от величины рабочего напряжения.

Оптимальная величина мощности входного модулирующего сигнала, при которой достигается максимальный коэффициент преобразования мощности, отличается для случаев взаимодействия электронного потока с замедленной волной высокочастотного поля "гребенки" на

плюс первой и минус первой пространственных гармониках.

При напряжении $V_a = 740$ В и рабочем токе умножителя $I_a = 30$ мА для получения наибольшего коэффициента преобразования мощности требуется меньшая мощность модулирующего сигнала, чем в случае минус первой пространственной гармоники при том же токе. Это, вероятно, обусловлено тем, что положение максимального значения тока четвертой гармоники с увеличением скорости потока электронов смещается к коллекторному концу ЗС. Для возвращения этого максимума в область оптимального взаимодействия с полем "гребенки" требуется большая мощность входного сигнала, так как известно [56], что при небольшой плотности пространственного заряда увеличение мощности модулирующего сигнала сдвигает максимум тока в направлении модулирующего каскада. Зависимость, представленная на рис. 5, получена при мощности входного сигнала, определяющей максимальный коэффициент преобразования мощности в режиме взаимодействия четвертой гармоники тока с минус первой пространственной гармоникой поля ($V_a = 3200$ В, $I_a = 60$ мА) "гребенки". В этом случае с изменением ускоряющего напряжения мощность входного сигнала поддерживали постоянной. Уменьшение интенсивности входного сигнала, как показывает эксперимент, приводит к тому, что значения выходной мощности умножителя в первом и втором максимуме и в промежутке между ними становятся равными по величине.

Увеличение рабочего тока, как правило, ведет к монотонному возрастанию мощности на выходе умножителя. Для примера, на рис. 6 показан характер изменения выходной мощности с ростом тока при работе умножителя на плюс первой и минус первой пространственных гармониках. При постоянной мощности входного сигнала в режиме взаимодействия с плюс первой пространственной гармоникой обнаруживается насыщение мощности выходного сигнала умножителя с изменением тока или переход через незначительный максимум. Умножение на минус первой гармонике сопровождается монотонным возрастанием мощности и насыщение можно обнаружить лишь при существенном уменьшении мощности входного сигнала. Исследование зависимости мощности на выходе умножителя от мощности на входе указывает на наличие оптимального значения последней, при котором выходная мощность прибора максимальна. Дальнейшее повышение мощности входного сигнала влечет за собой уменьшение выходной мощности умножителя, т. е. явление "перемодуляции", характерное для клистронных умножителей [1,2]. Оптимальное значение мощности входного сиг-

нала не зависит от величины тока и возрастает с увеличением последнего.

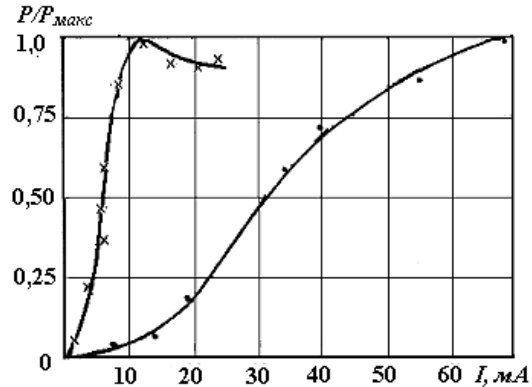


Рис. 6. Характер изменения выходной мощности с ростом тока при работе умножителя на плюс первой и минус первой пространственных гармониках

4. Умножительные клинотроны с высоким коэффициентом умножения [31]. В процессе экспериментальных исследований были определены характеристики экспериментального образца УМК с $k_f > 10$, принципиальные и конструктивные особенности которого описаны в работах [28-31]. Геометрические параметры его периодической ЗС типа "гребенка" были рассчитаны для возбуждения электромагнитных колебаний первой отрицательной пространственной гармоники поля в 2-мм диапазоне электронным потоком, который предварительно модулировали сигналом 3-см диапазона с помощью клистронного резонатора.

Размеры "гребенки" приведены в табл. 2. При частоте модулирующего сигнала $\Omega = 9,05$ ГГц соответствующей собственной частоте тороидального резонатора, с помощью ЗС, которая возбуждалась в режиме клинотрона, осуществлялся отбор мощности на волнах $\lambda_{13} = 2,55$ мм, $\lambda_{14} = 2,37$ мм, $\lambda_{15} = 2,21$ мм, что соответствует коэффициентам преобразования частоты $k_f = 13$; $k_f = 14$; $k_f = 15$, т. е. тринадцатой, четырнадцатой и пятнадцатой гармоникам частоты Ω модулирующего сигнала. Максимальная мощность на этих волнах достигалась при ускоряющих напряжениях, лежащих вблизи синхронного взаимодействия тока соответствующей гармоники и замедленной волны в "гребенке". На рис. 7 приведена зависимость относительной выходной мощности умножителя $\frac{P_k}{P_{k \text{ макс}}}$ от величин

ускоряющего напряжения V при постоянной мощности входного модулирующего сигнала. Сплошная кривая на рис. 7 демонстрирует относительные значения выходной мощности умно-

жителя при тринадцатой, четырнадцатой и пятнадцатой кратном умножении в случае оптимальной величины мощности входного модулирующего сигнала для пятнадцатой гармоники тока. Следует отметить, что величина мощности входного модулирующего сигнала, оптимальная для пятнадцатой гармонки тока, вызывает явление "перемодуляция" электронного потока на четырнадцатой и тем более на тринадцатой гармонике, приводящее к уменьшению выходной мощности на них.

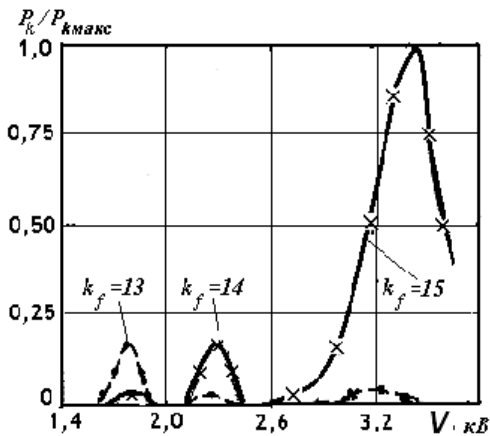


Рис. 7. Зависимость относительной выходной мощности умножителя на тринадцатой, четырнадцатой и пятнадцатой гармониках от ускоряющего напряжения

Анализ результатов эксперимента позволяет сделать вывод о том, что уменьшение выходной мощности умножителя (явление "перемодуляции") следует связывать не с уменьшением амплитуды в первом, после модулятора, максимуме соответственно тринадцатой и четырнадцатой гармоник тока, а с перемещением положения этого максимума из пространства, занимаемого "гребенкой" в направлении к модулятору, в область пассивного пространства дрейфа. Следовательно, при выбранных длине и местоположении каскада отбора мощности для обеспечения оптимального расположения первого после модулятора максимума соответствующей гармоники тока над "гребенкой" требуется определенная величина мощности входного модулирующего сигнала. Она соответствует максимальной мощности на выходе умножителя. Явление "перемодуляции" электронного потока легко наблюдать, если использовать входной сигнал, модулированный по амплитуде. Штриховой линией на рис. 7 изображена зависимость относительной выходной мощности умножителя на тринадцатой, четырнадцатой и пятнадцатой гармониках при максимальной мощности модулирующего входного сигнала для тока тринадцатой гармоники. Как видно из графика, выходная мощность на

четырнадцатой и пятнадцатой гармониках уменьшается, так как для них требуется более высокая мощность входного сигнала в случае выбранного расположения резонатора, пространства дрейфа и "гребенки". Возрастание оптимального значения мощности входного сигнала с ростом коэффициента преобразования по частоте k_f определяется, вероятно, переносом первого после модулятора максимума тока соответствующей гармоники k к коллекторному концу прибора. Перенос обусловлен увеличением скорости электронного потока с возрастанием k_f .

Вместе с тем, из работы [38] следует, что при постоянной скорости потока максимум амплитуды гармоники тока приближается к модулятору.

При постоянной величине рабочего тока и оптимальных уровнях мощности модулирующего сигнала интенсивность выходного сигнала УМК, и, следовательно, коэффициент преобразования мощности возрастают с увеличением коэффициента преобразования частоты для каждой гармоники. Это, вероятно, обусловлено ростом сопротивления связи ЗС с укорочением длины волны, а также оптимальным расположением первого максимума гармоники тока над рабочей поверхностью "гребенки". Ширина области генерации по напряжению для тринадцатой гармоники составляет ≈ 150 В по уровню половинной мощности. Она увеличивается с ростом коэффициента преобразования частоты k_f для четырнадцатой гармоники до ≈ 200 В, для пятнадцатой — ≈ 400 В, что обусловлено снижением крутизны частотно-вольтовой характеристики "гребенки" с возрастанием ускоряющего напряжения.

Характер процесса "перемодуляции" электронного потока и снижения выходной мощности умножителя с увеличением мощности входного модулирующего сигнала можно проследить по зависимостям, приведенным на рис. 8. Из рисунка следует, что в наблюдаемых режимах имеет место перемещение в пространство взаимодействия "гребенки" также и второго максимума распределения тока гармоники. Это определяет переход зависимости через минимум и появление второго максимума в зависимости выходной мощности УМК от мощности входного модулирующего сигнала. Величина второго максимума, как правило, несущественно отличается от величины первого максимума и может даже превышать его. Это указывает на необходимость смещения каскада отбора мощности ближе к модулирующему каскаду с целью обеспечения работы на первом максимуме, чем можно повысить коэффициент преобразования мощности k_p при тех же режимах работы умножителя.

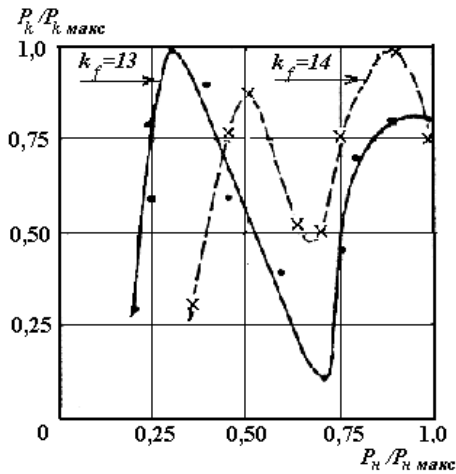


Рис. 8. Характер изменения выходной мощности УМК от величины мощности входного сигнала

Анализ экспериментальных результатов позволяет предположить, что повышение рабочего тока УМК приводит к смещению максимума в распределении тока гармоники вдоль пространства взаимодействия к коллектору, что проявляется, в частности, в эффекте исчезновения "перемодуляции". На рис. 9 показаны относительные зависимости оптимального значения мощности накачки $P_{вх}/P_{вх\max}$ (сплошная кривая) и выходной мощности 14-й гармоники умножителя $P_{14}/P_{14\max}$ (штриховая кривая) от величины рабочего тока для $k_f = 14$. Значения относительной мощности накачки, расположенные в полуплоскости выше кривой, приводят к появлению "перемодуляции". Увеличение тока УМК, работающего в режиме близком к оптимальной мощности входного сигнала или соответствующем явлению "перемодуляции", обуславливает монотонный рост выходной мощности. Однако, при существенном снижении интенсивности накачки относительно оптимального ее значения, обнаруживается уменьшение выходной мощности умножителя с увеличением тока.

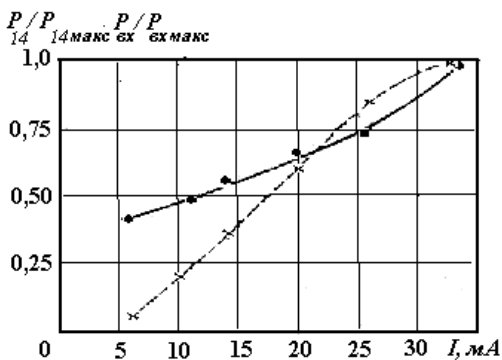


Рис. 9. Характер изменения оптимальных входной и выходной мощностей УМК от величины тока I для $k_f = 14$

Рис. 10 иллюстрирует зависимости мощности УМК от величины рабочего тока при низкой мощности входного сигнала для трех значений коэффициента преобразования частоты: 13, 14 и 15. Видно, что оптимальные значения по току возрастают с увеличением k_f . Наличие максимума по току определяется, вероятно, существенным сносом максимума тока соответствующей гармоники из области расположения каскада отбора мощности к коллекторному концу умножителя.

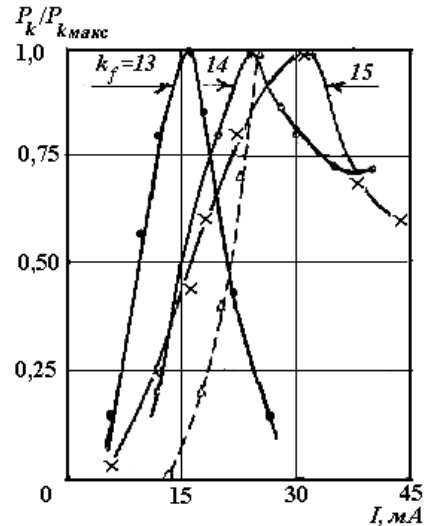


Рис. 10. Зависимость выходной мощности УМК от рабочего тока I для $k_f = 13, 14, 15$

Рост рабочего тока УМК обуславливает дальнейшее смещение этого максимума к коллектору и поэтому снижение выходной мощности не может быть компенсировано происходящим при этом повышением амплитуды тока гармоники. На рис. 10 пунктиром изображена зависимость относительной мощности умножителя для $k_f = 14$ от тока в случае выбора оптимальной мощности входного сигнала для наибольшего значения последнего. Уменьшение тока УМК в этом случае приводит к "перемодуляции" электронного потока и к уменьшению выходной мощности. Скорость спада мощности больше при наличии "перемодуляции", чем при ее отсутствии.

Максимальный коэффициент преобразования мощности при пятнадцатикратном умножении частоты достигал примерно - 40 дБ для мощности входного сигнала $P_{вх} \approx 50$ Вт. Необходимо отметить, что на уменьшение коэффициента преобразования мощности в значительной мере влияет сильная неоднородность тока на границе электронного потока, обусловленная пульсациями. Пульсации, как правило, способствуют возникновению обедненного слоя [15,16] и существенному снижению энергообмена между пото-

ком электронов и полей волны пространственной гармоники замедляющей системы в генераторах типа ЛОВО карсинотрон миллиметрового диапазона. Действенным способом повышения эффективности энергообмена между электронным потоком и электромагнитной волной ЗС в этом случае является клинотронный эффект [14].

В экспериментальных образцах УМК наклон рабочей поверхности ЗС к направлению движения электронного потока обеспечивали в процессе сборки конструкции прибора и корректировали фокусирующим магнитным полем. Образцы испытывали в однородном магнитном поле $H = 3500$ Эр, которое создавали с помощью электромагнита.

Проведенные экспериментальные исследования физических процессов в УМК показали возможность практической реализации в коротковолновых диапазонах умножителя с высоким коэффициентом преобразования частоты и с уровнем мощности выходного сигнала, пригодным для практических применений. Например, применение в УМК в качестве модулирующего каскада сдвоенного резонатора "цилиндр со щелью" 3-мм диапазона волн (100 ГГц) позволит получить электромагнитное излучение мощностью единицы милливольт в интервале частот 1,3 - 1,5 ТГц. Для достижения более высоких коэффициентов преобразования частоты и мощности в описанных выше режимах работы УМК необходимо минимизировать длину пространства дрейфа.

5. Режим умножения с возбуждением автоколебаний в каскаде отбора мощности УМК. Эффективность процесса умножения возрастает в случае возбуждения в каскаде отбора мощности автоколебаний клинотронного режима. С наклоном плоскости симметрии ленточного электронного потока под углом $\varphi \approx 0,5^\circ - 6^\circ$ к рабочей поверхности ЗС типа "гребенка" происходит увеличение коэффициента преобразования по мощности, т. е. увеличение выходной мощности умножителя. Скорость спада мощности с изменением угла наклона φ , после прохождения максимума примерно равна скорости нарастания.

Путем введения дополнительных отражений у пушечного и коллекторного концов ЗС возбуждали каскад отбора мощности умножителя в клинотронном режиме в диапазоне $34,88 \text{ ГГц} \leq \omega_4 \leq 35,7 \text{ ГГц}$ без модуляции электронного потока входным сигналом от внешнего источника. Пусковой ток при этом составляет $I_{\text{пуск}} = 20-30$ мА.

Предварительная модуляция электронного потока по скорости приводит к подавлению сигнала клинотрона, выражающемуся как в плавном снижении мощности до полного срыва гене-

рации, так и в повышении пускового тока возбуждения. Изменения мощности клинотрона в зависимости от величины мощности входного сигнала приведено на рис. 11 для нескольких значений рабочего тока (напряжение во всех случаях было равно $V_a = 3250$ В). При частоте входного сигнала соответствующей собственной частоте модулирующего резонатора $\Omega = 9,05$ ГГц, происходит подавление мощности автоколебаний во всем диапазоне частот самовозбуждения выходного каскада умножителя. Явление подавления мощности выходного сигнала УМК со скоростной модуляцией электронного потока в модулирующем каскаде внешним сигналом связано с разбросом скоростей электронов.

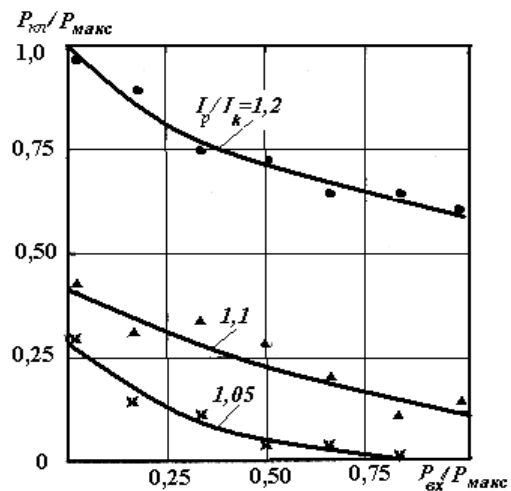


Рис. 11. Характер изменения выходной мощности УМК от величины мощности входного сигнала

Исследование процесса умножения частоты в случае возбуждения каскада отбора мощности УМК удобно производить при синусоидальной модуляции амплитуды входного сигнала и работе УМК в непрерывном режиме. Осциллограммы сигнала, полученные в процессе исследований режима работы такого УМК, показаны на рис. 12. Они свидетельствуют об автоколебательном режиме работы каскада отбора мощности УМК (рабочее напряжение $V_a = 2690$ В, рабочий ток $I_a = 64$ мА, длина волны $\lambda = 8,49$ мм) без воздействия входного сигнала. Если подать в резонатор модулирующего каскада входной сигнал с импульсной мощностью в сотни милливольт на частоте $\Omega = 9,05$ ГГц, то наблюдается подавление автоколебаний клинотрона каскада отбора мощности (рис. 12,б). Дальнейшее повышение мощности входного сигнала приводит к уменьшению амплитуды автоколебаний до нуля (рис. 12,в). На рис. 12,г показана эпюра сигнала, демонстрирующая момент одновременной работы клинотрона-генератора и умножителя, когда

его сигнал автоколебаний подавлен. Данное явление наблюдалось при определенной величине мощности входного сигнала. При этом уровень выходной мощности умножителя может достигать величины мощности клинотрона-автогенератора (рис. 12,д) либо превосходить ее вследствие регенеративного усиления (рис. 12,е). Клинотрон-автогенератор работал на волне $\lambda = 8,49$ мм, а клинотрон-умножитель на $\lambda = 8,29$ мм.

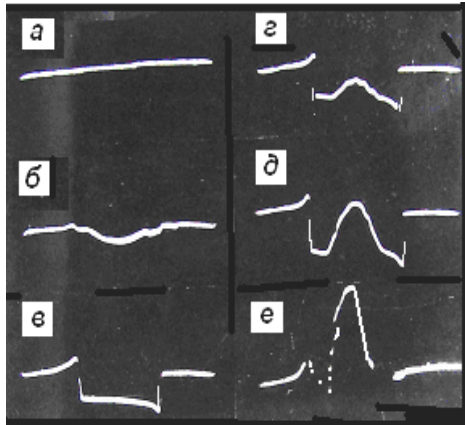


Рис. 12. Режимы работы УМК, синхронизированного гармоникой тока

Проведенные исследования подтвердили целесообразность применения умножительного клинотрона в качестве источника СВЧ колебаний миллиметрового диапазона волн. Разработанная методика позволила определить основные особенности работы УМК и выработать рекомендации по оптимизации его основных узлов. "Клинотронный эффект" обеспечивает повышение энергообмена между электронным потоком и полем ЗС. При входном сигнале 3-см диапазона мощностью 50 Вт на выходе УМК зарегистрирована мощность 0,5 Вт сигнала 8-мм диапазона.

6. Использование высших типов колебаний "гребенки" при умножении частоты. О целесообразности применения режимов работы на высших типах колебаний периодических структур при создании электровакуумных источников электромагнитного излучения с очень короткими длинами волн выходного сигнала упомянуто в монографии [14]. Режимы работы таких устройств позволяют, в частности, осуществить в одновременном акте процесса взаимодействия отбор энергии у заряженных частиц и передачу ее в нагрузку. При этом отбор энергии осуществляется посредством пространственной гармоники замедленной волны высокочастотного поля, а передача в нагрузку высокочастотной энергии, полученной в процессе взаимодействия, - посредством пространственной гармоники поля быстрой (вытекающей) волны, отрывающейся от поверх-

ности периодической структуры, т. е. дифракционного излучения [15]. При размещении периодической структуры в высокочастотном резонаторе, который обеспечивает обратную связь и резонанс на быстрой волне, эффективность таких источников электромагнитного излучения возрастает [38-43].

Результаты экспериментального исследования дифракционного излучения (эффекта Вавилова-Черенкова, Смита-Парселла) в умножителях частоты с открытыми периодическими структурами без резонатора представлены в работах [35-37]. При этом лабораторные макеты с такой электродинамической системой обеспечивали невысокий коэффициент преобразования мощности.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований умножителей частоты миллиметрового диапазона, каскадом отбора мощности которых служит периодическая структура типа "гребенка". "Гребенку" устанавливали в призматический резонатор и возбуждали на высших типах колебаний ленточным электронным потоком, при этом острый угол φ между его плоскостью симметрии и рабочей поверхностью "гребенки" находился в интервале $0,5 \bullet - 1 \bullet$ [33,43].

Основные соотношения [43]. Известно, что замедление в любой периодической структуре на q -й пространственной гармонике колебания типа α определяется с помощью соотношения:

$$n_{q\alpha} = n_{0\alpha} + q \frac{\lambda}{d}, \quad (2)$$

где $n_{0\alpha} = \frac{\beta_{0\alpha z}}{k}$ - замедление на основной пространственной гармонике колебания типа α ; k - волновое число свободного пространства; $\beta_{0\alpha z}$ - z -компонента волнового вектора; α - индекс, который определяется целыми числами m, n, p , характеризующими данный тип электрической или магнитной волны; λ - длина волны в свободном пространстве; d - период замедляющей структуры.

Замедление на нулевой пространственной гармонике колебания типа α выражается через компоненты волнового вектора $\beta_{0\alpha x}$ и $\beta_{0\alpha y}$ следующим образом:

$$n_{0\alpha} = \sqrt{1 - \frac{\beta_{0\alpha x}^2}{k^2} - \frac{\beta_{0\alpha y}^2}{k^2}}. \quad (3)$$

Учитывая (2), (3), замедление на q -й пространственной гармонике можно записать в виде:

$$n_{0\alpha} = \sqrt{1 - \frac{\beta_{0\alpha x}^2}{k^2} - \frac{\beta_{0\alpha y}^2}{k^2}} + q \frac{\lambda}{d}. \quad (4)$$

Если поле вдоль оси y однородное, то $\beta_{0\alpha y} = 0$. Согласно формуле (4) можно наблюдать режимы, при которых существуют быстрая нулевая гармоника ($n_{0\alpha} < 1$; $\beta_{0\alpha x}$ и $\beta_{0\alpha y}$ - действительные), отрывающаяся от поверхности периодической структуры, и медленная высшая пространственная гармоника ($n_{q\alpha} > 1$), если $\frac{\lambda}{d} \geq 2$. Угол излучения $\theta_{0\alpha}$ быстрой нулевой гармоники определяется соотношением

$$\cos \theta_{0\alpha} = \frac{\beta_{0\alpha z}}{k}. \quad (5)$$

Таким образом, общий вид дисперсионной характеристики для быстрой основной пространственной гармоники колебания типа α и соответствующей ей q -й медленной гармоники согласно (4), (5) описывается соотношением

$$n_{q\alpha} = \cos \theta_{0\alpha} + q \frac{\lambda}{d}. \quad (6)$$

Следует заметить, что при $\lambda > 2d$ основная пространственная гармоника может быть быстрой не во всем диапазоне перестройки, а только на некотором участке дисперсионной кривой. Условия существования высших типов волн в периодической структуре определяются величиной отношения расстояния между двумя параллельными проводящими плоскостями, на одной из которых расположена "гребенка", к длине волны излучения.

Особенности конструкции умножителя.

Экспериментально исследован умножитель частоты (рис. 13), состоящий из следующих узлов: ЭОС 1, формирующей ленточный электронный поток 2; модулирующего каскада, представляющего собой клистронный резонатор 3; пространства дрейфа 4, в котором модуляция электронного потока по скорости переходит в модуляцию по плотности; каскада отбора мощности 5, работающего на высших типах колебаний. Каскад отбора мощности представлял собой периодическую ЗС типа "гребенка" 6, рассчитанную для работы в 8-мм диапазоне и помещенную в призматический резонатор 7. Вывод высокочастотной энергии в нагрузку осуществлялся с помощью волновода 8 через щель связи в стенке резонатора 7. противоположной поверхности периодической структуры 6. Стенка 9 - подвижна, благодаря чему осуществлялась перестройка резонатора.

Дисперсионное уравнение для волны, распространяющейся нормально к поверхности ЗС в каскаде такого типа, имеет вид

$$\frac{\beta_{0\alpha x}}{k} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}. \quad (7)$$

Здесь $\lambda_{кр}$ - критическая длина волны, распространяющейся нормально к поверхности ЗС. Она определяется поперечными размерами резонатора a и b :

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}. \quad (8)$$

Используя представление о парциальных волнах, можно определить угол падения фронта волны $\theta_{пад}$ на боковую стенку резонатора

$$\sin \theta_{пад} = \frac{\beta_{0\alpha x}}{k}. \quad (9)$$

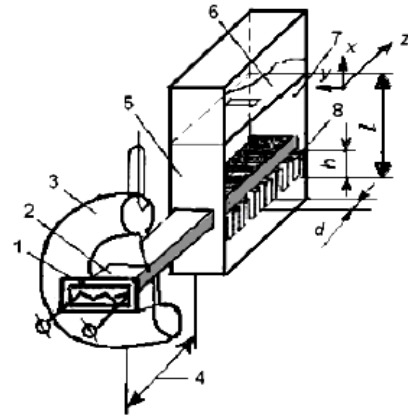


Рис. 13. Схема умножителя частоты

Нетрудно заметить, что в нашем случае $\theta_{пад} = \theta_{0\alpha}$, следовательно, дисперсионное соотношение для волн, у которых основная гармоника является быстрой согласно (6)-(9), можно записать в виде

$$n_{q\alpha} = q \frac{\lambda}{d} - \frac{\lambda}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}. \quad (10)$$

Таким образом, в используемом каскаде отбора мощности длина волны излучения определяется скоростью потока электронов (в случае синхронизма потока и медленной поверхностной пространственной гармоники поля), периодом системы d , размерами призматического резонатора a , b и типом распространяющейся волны m , n . Размер резонатора l определяет эффективность передачи в нагрузку высокочастотной энергии от соответствующей гармоники тока.

Угол, под которым можно было наблюдать излучение в экспериментах [35-37], лежит в пределах $\theta = 0 - 90^\circ$, а при использовании вы-

сокодобротных резонаторов [32, 33, 38-43] $\theta \approx 90^\circ$. Призматический резонатор накладывает условие (9) на спектр излучения, возможного в пределах угла $\theta = 0 - 90^\circ$. Так как в плоскости периодической структуры поперечное сечение резонатора $a \times b = 7,2 \times 2,4 \text{ мм}^2$, то размер a определил длину "гребенки", которая содержит в себе 14 полных периодов ($d = 0,5 \text{ мм}$). Ширина "гребенки" 3 мм, глубина ее щелевого резонатора $h = 1,87 \text{ мм}$. Высота призматического резонатора l изменялась в процессе измерений в пределах 46,5 - 63 мм. Связь выходного волновода 8 с резонатором осуществлялась посредством емкостной диафрагмы с отверстием $3 \times 0,1 \text{ мм}^2$. Модулирующий каскад умножителя представлял собой клистронный резонатор с механической емкостной перестройкой, обеспечивающей настройку на частоту генератора входного сигнала, работающего в 3-см диапазоне ($f_0 = 9,05 - 10,0 \text{ ГГц}$). Связь тороидального резонатора с источником входного сигнала осуществлялась посредством коаксиала с петлей. Когда производили настройку призматического резонатора каскада отбора мощности на частоту гармоники входного модулирующего сигнала, то на выходе умножителя наблюдали сигнал $f_k = k_f f_0$ (k_f - коэффициент преобразования частоты).

Результаты эксперимента. Амплитуда выходного сигнала умножителя, как показывают исследования, зависит от скорости электронного потока. Для примера на рис. 7 представлена зависимость от ускоряющего напряжения относительной мощности выходного сигнала в децибелах относительно уровня в 1 мВт на частоте $f_5 = 47,5 \text{ ГГц}$ при постоянной мощности входного модулирующего сигнала $f_0 = 9,5 \text{ ГГц}$ для трех значений высоты резонатора l : 48,5; 51,5; 59 мм. Естественно предположить, что максимум сигнала на выходе достигается при синхронизме электронного потока с медленной пространственной гармоникой поля периодической системы - "гребенки". Действительно, максимумы мощности, полученные в эксперименте при изменении ускоряющего напряжения, неплохо описываются соотношением (10) для волн, у которых основная гармоника не является поверхностной.

Размеры призматического резонатора каскада отбора мощности выбраны такими, что возбуждение его четвертой гармоникой модулированного потока электронов в диапазоне $\lambda_4 = 7,6 - 8,3 \text{ мм}$ было возможно только на колебаниях типа $H_{1,0,p}$ ($p = 10-13$). На рис. 14 приведены расчетные зависимости резонансных длин волн призматического резонатора без периодиче-

ской структуры от его высоты l . Высота l отсчитывается от дна резонаторов "гребенки" до диафрагмы. Результаты измерений резонансных длин волн аналогичного резонатора с периодической структурой, который возбуждался четвертой гармоникой тока, взаимодействующей с медленной основной пространственной гармоникой поля в диапазоне $\lambda_4 = 7,6 - 8,3 \text{ мм}$, изображены точками. Призматический резонатор возбуждается медленной волной "гребенки" в результате трансформации ее на неоднородностях границ. Периодическая структура в резонаторе обуславливает некоторое различие фазовых сдвигов, полученное в результате расчета и измерений. Соотношение (10) не накладывает ограничивающего условия на глубину резонатора "гребенки" в случае ее работы на высших типах колебаний. Поэтому можно возбуждать периодическую структуру в широком диапазоне длин волн $2d \leq \lambda \leq 4h$ как на первой, так и на других пространственных гармониках в конструкциях, где в данном диапазоне существуют высшие типы волн.

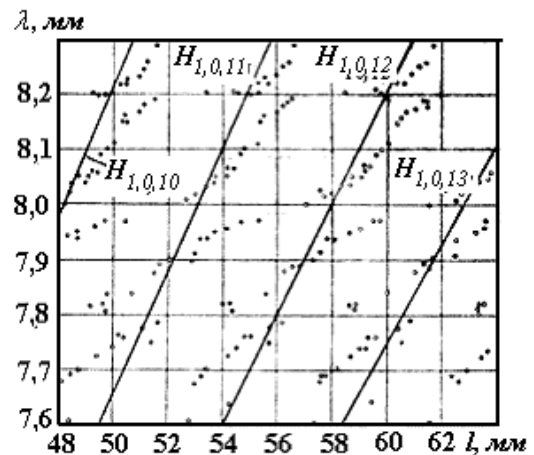


Рис. 14. Рассчитанная (—) и измеренная (○ ○ ○ ○) зависимости резонансной длины волны призматического резонатора от его высоты l для $k_f = 14$

На рис. 14 точками показаны экспериментальные результаты измерения резонансных длин волн того же призматического резонатора с "гребенкой", возбуждаемого пятой гармоникой тока на трех типах колебаний $H_{1,0,p}$, $H_{2,0,p}$, $H_{0,1,p}$, в диапазоне $\lambda_5 = 6,14-6,65 \text{ мм}$. В точках резонанса для каждого из возбуждаемых типов колебаний $H_{m,n,p}$ резонатора оптимальная скорость электронного потока определялась соотношением (10).

Расчетные зависимости резонансных длин волн резонатора без "гребенки" для соответствующих типов $H_{m,n,p}$ и пятой гармоники входного сигнала в том же диапазоне показаны

линиями (в этом случае высота резонатора l отсчитывалась от вершины зуба "гребенки" до диафрагмы).

Как видно из рис. 14 и 15, существует возможность селекции частотных гармоник путем соответствующей настройки призматического резонатора. При некоторых значениях размера l можно наблюдать четвертую и пятую гармоники одновременно.

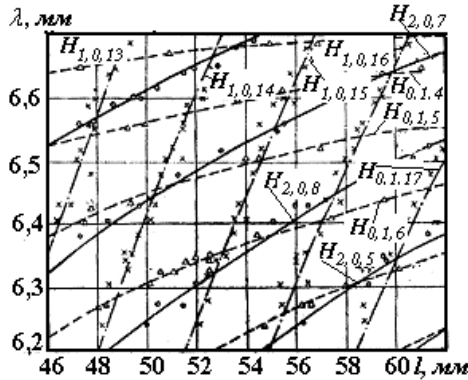


Рис. 15. Зависимости резонансной волны λ призматического резонатора от его высоты l для $k_f = 5$: расчетные - $H_{1,0,p}$ (---); $H_{2,0,p}$ (—); $H_{0,1,p}$ (---); экспериментальные - $H_{1,0,p}$ (•); $H_{2,0,p}$ (○); $H_{0,1,p}$ (Δ)

На рис. 16 приведены рассчитанные по формуле (10) кривые, представляющие собой

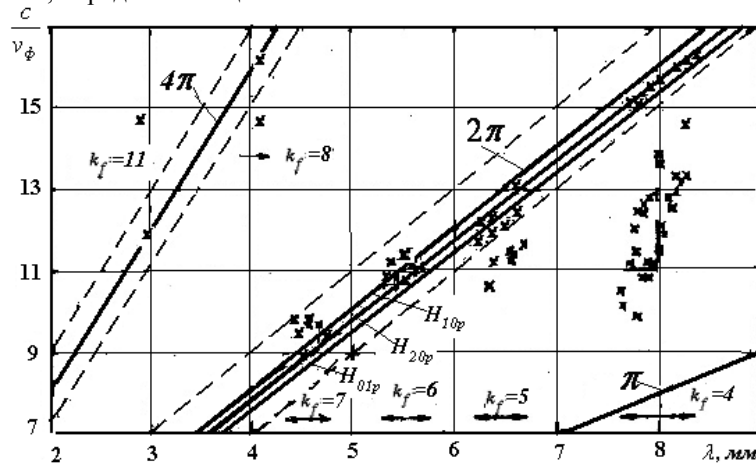


Рис. 16. Зависимость замедления c/v_y от длины волны λ на выходе умножителя: (X) - результаты измерений, соответствующие максимуму эффективности взаимодействия; (—) режим, при котором существует скользкая в направлении оси z волна

С укорочением длины волны размеры резонатора позволяют возбуждать его на типах $H_{2,0,p}$ и $H_{0,1,p}$. Например, выделение сигнала пятой гармоники произведено на типах $H_{1,0,p}$, $H_{2,0,p}$, $H_{0,1,p}$, в интервале длин волн $\lambda_5 = 6,14-6,65$ мм (рис. 16, $k_f = 5$). Следует заметить, что

зависимость замедления пространственной гармоники поля, с которой взаимодействует электронный поток, от длины волны выходного сигнала умножителя. Данные измерений, соответствующие максимуму эффективности взаимодействия, изображены крестиками. Из рис. 16 видно, что передача энергии в нагрузку от четвертой ($k_f = 4$) и пятой ($k_f = 5$) гармоник модулированного потока происходила в зависимости от режима работы, как на быстрой волне основной пространственной гармоники, так и на поверхностной волне, трансформированной в волноводную неоднородностями на границах гребенки. Режимы передачи энергии на быстрой волне основной пространственной гармоники установившегося типа колебаний отмечены крестиками, расположенными между пунктирными линиями вблизи $\varphi = 2\pi$. Пунктирные линии соответствуют режиму, при котором существует "скользящая" в направлении оси z волна, у которой тангенциальные компоненты волнового вектора отсутствуют и фазовая скорость основной пространственной гармоники равна c [35]. Режимам работы, при которых наблюдалось возбуждение призматического резонатора медленными поверхностными гармониками поля "гребенки", соответствуют крестики, расположенные ниже пунктирной линии.

для эффективного вывода высокочастотной энергии на быстрой волне требуются меньшие ускоряющее напряжение и мощность входного модулирующего сигнала, чем в случае медленной волны. На рис. 16 крестиками отмечены также результаты измерений при $q = 1$ и возбуждении каскада отбора мощности умножителя на шестой и седьмой гармониках входного сигнала быстрой

волной в диапазонах $\lambda_6 = 5,07 - 5,53$ мм и $\lambda_7 = 4,34 - 4,74$ мм. Тип колебаний резонатора в этом случае не исследовался. При потерях преобразования не выше 40 дБ мощность четвертой - седьмой гармоник превышала 1 мВт.

Экспериментально наблюдался также эффект умножения на высших гармониках $q = 2$ ($k_f = 8$; $\lambda_8 = 4,04$ мм) и $q = 3$ ($k_f = 11$; $\lambda_8 = 2,93$ мм) высших типов колебаний (рис. 16). Эти результаты показывают возможность повышения кратности умножения до $k_f = 10$ и более при использовании высших типов колебаний

"гребенки". Эффект умножения наблюдался как в продольном фокусирующем магнитном поле, так и без него. Однако сигнал четвертой и пятой гармоник УМК, работающего без магнитного поля, был на 5 - 7 дБ слабее.

Некоторое представление об особенностях работы умножителя, каскадом отбора мощности которого является призматический резонатор с периодической структурой типа "гребенка", можно получить из табл. 3, где по некоторым параметрам проведено сопоставление его с приборами, созданными на принципе дифракционного излучения.

Таблица 3

Литература	Длина волны λ	Номер пространственной гармоники q	Номер типа колебаний α	Угол излучения $\theta_{0\alpha}$	Рабочее напряжение U , кВ
19	$\lambda < 2d$	$q \approx 1$	Высокий	0-90°	330
35	$\lambda < 2d \approx 10h$	$q \square 1$	Низкий	0-90°	2,3
36,37	$\lambda > 2d$	$q \geq 1$	Невысокий	0-90°	33
38-42	$\lambda < 2d \approx 4h$	$q = 1$	Невысокий	$\approx 90^\circ$	2-6
33,43	$\lambda \leq 2d \leq 4h$	$q \geq 1$	Невысокий	$\cos \theta_{0\alpha} = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$	0,5-2,5

От описанных в работах [7,8] приборов умножитель с призматическим резонатором, кроме конструкции, отличается величинами номеров пространственной гармоники q и типа колебаний α , рабочим напряжением U , а также значительно меньшими дифракционными потерями излучения. Проведенные исследования показали, что:

- для отбора мощности от гармоник модулированного электронного потока можно использовать каскад, конструктивно выполненный в виде призматического резонатора, в котором размещена периодическая структура - "гребенка";

- передача в нагрузку энергии высокочастотного поля "гребенки", возбужденного гармониками тока, в зависимости от режима может осуществляться как медленными, так и быстрыми пространственными гармониками высших типов колебаний; возможно возбуждение резонатора на колебаниях типа $H_{1,0,p}$, $H_{2,0,p}$, $H_{0,1,p}$, и др. в диапазоне длин волн, определяющемся условием $2d \leq \lambda \leq 4h$;

- с помощью периодической структуры - "гребенки" 8-мм диапазона, помещенной в каскад отбора мощности умножителя, получены коэффици-

циенты преобразования частоты k_f ; = 4-8; 11 (при входном сигнале 3-см диапазона), а также коэффициенты преобразования мощности не хуже - 40 ÷ -50 дБ;

- возможна работа умножителя без фокусирующего магнитного поля.

Возбуждение дифракционной ЗС типа "гребенка", помещенной в открытую или адекватную ей резонансную электродинамическую систему, на высших типах колебаний позволяет создавать источники электромагнитного излучения в интервале частот 300 - 3000 ГГц с выходной мощностью 1 - 10 мВт, достаточной для ряда практических применений.

7. Умножительные оротроны. Схематическое изображение умножительного оротрона [32] представлено на рис. 17. Это гибридная лампа, в которой ЭОС 1 формирует "толстый" ленточный электронный поток 2, в модулирующем каскаде применен двухрезонаторный пролетный клистрон 5-мм диапазона с резонаторами в виде сдвоенного цилиндра со щелью, служащий группирователем гармоник, а в каскаде отбора мощности - оротрон [37,38], который является усилителем гармоник. Электродинамическая система каскада отбора мощности лампы представляет собой ОР, образованный двумя зеркалам" 5,6, на

одном из которых (плоском или в виде вогнутой поверхности цилиндра 5) выполнена замедляющая дифракционная периодическая структура - "гребенка", а на другом - сферическом - установлено устройство 7 для вывода высокочастотной энергии. Ленточный электронный поток 2, сгруппированный в сгустки клистронным группирователем 3, падает на замедляющую систему оротрона под острым углом α . Если частота одной из гармоник электронного потока окажется близкой к одной из собственных частот ОР и скорость электронной волны этой гармоники будет близка к фазовой скорости одной из пространственных гармоник электродинамической системы, то ОР эффективно возбуждается этой гармоникой тока.

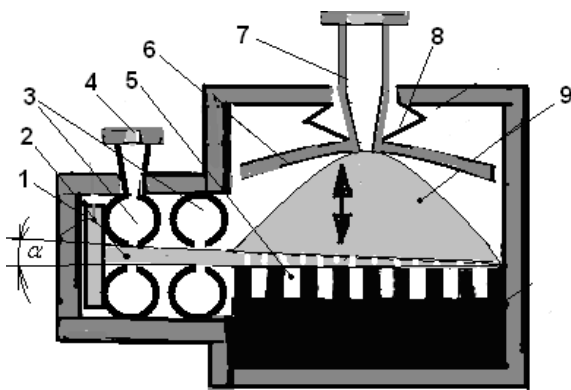


Рис. 17. Схематическое изображение умножительного оротрона

Умножительный оротрон может работать в двух режимах: неавтономного умножителя частоты; автономного умножителя частоты. В первом случае клистронный группирователь возбуждается внешним источником электромагнитных колебаний и модулирует ленточный электронный поток, работая в режиме клистронного усилителя внешнего сигнала. ОР возбуждался гармониками конвекционного тока и работает как усилитель колебаний умноженной частоты в оротронном режиме, т. е. гармоника тока отдает энергию электронов замедленной пространственной гармонике поля, а передача в нагрузку полученной высокочастотной энергии осуществляется вытекающей быстрой волной, волновой вектор которой направлен нормально к рабочей поверхности "гребенки". Весь прибор работает как обычный умножитель частоты. Во втором случае клистронный группирователь вместе с пучком работает в режиме автогенератора, а ОР возбуждается гармониками тока на частоте одной из гармоник генерации. В этом случае прибор работает как автономный умножитель частоты.

Перспективность этого источника электромагнитного излучения для работы в милли-

метровом и субмиллиметровом диапазонах волн определяется следующими факторами:

- электронный пучок сохраняет свои нелинейные свойства и в этих диапазонах;

- клистронный принцип генерации и усиления реализован во всем миллиметровом диапазоне, например, в клистронах с распределенным взаимодействием (КРВ), а ОР по существу не имеют частотных ограничений при укорочении длины волны.

- применение электронного пучка в качестве нелинейного элемента, а периодической структуры и ОР в качестве микроволновой структуры по существу снимает ограничения по уровню входной или генерируемой мощности по теплоотводу и т. д.

Экспериментальное исследование умножительного оротрона. Исследования оротрона-ГДИ показали возможность его возбуждения в режиме ЛОВО и режиме оротрона [40-42]. При определенных условиях возможна конкуренция указанных режимов автоколебаний в приборах с открытыми или аналогичными открытым электродинамическими системами. Результаты исследования высших типов колебаний "гребенки" при возбуждении гармониками тока показали возможность создания умножителей частоты в коротковолновых диапазонах, с каскадами отбора мощности, возбуждаемыми как в режиме ЛОВО клинотрона при взаимодействии электронов с замедленными волнами, так и в режиме оротрона [43] с дифракционным излучением на колебаниях 0-вида, 2π -вида, 4π -вида.

Для экспериментальной проверки принципа оротронного умножения частоты была применена усовершенствованная конструкция умножителя частоты на высших типах колебаний, представленная на рис. 13 [33,43]. С целью обнаружения колебаний 2π -вида, свойственных оротрону-ГДИ, "гребенку" нагрузили призматическим резонатором, запрещающим возбуждение колебаний системы на не основных типах волн в волноводе. В экспериментальных образцах умножителя 8-мм диапазона в качестве такого резонатора был выбран отрезок стандартного волновода сечением $7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2$ с подвижной диафрагмой, что определило длину "гребенки". Внешний вид умножительного оротрона с призматическим резонатором показан на рис. 18.

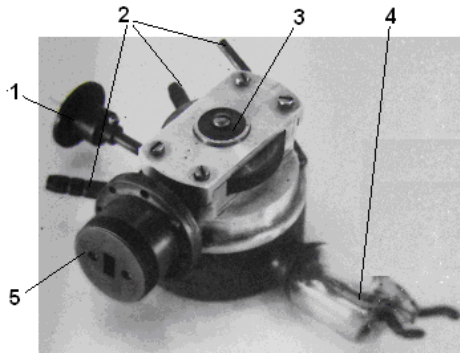


Рис. 18. Внешний вид умножительного оротрона 6-мм диапазона с призматическим резонатором: 1 - коаксиальный ввод сигнала внешнего источника в модулирующий каскад; 2 - элементы системы жидкостного охлаждения; 3 - механизм перестройки частоты клистронного резонатора; 4 - высоковольтные входы; 5 - волноводный вывод высокочастотной энергии

Модулирующий каскад умножителя в виде тороидального клистронного резонатора 3-см диапазона имел емкостную механическую перестройку резонансной частоты в диапазоне работы генератора входного сигнала $f_{вх} = 8,85 - 9,80$ ГГц, каскад отбора мощности - призматический резонатор с "гребенкой" - перестраивали с помощью подвижной диафрагмы, выполняющей также функцию зеркала. Основные параметры замедляющей системы: геометрическая длина 7,2 мм; ширина 3 мм; глубина щелевого резонатора $h = 1,87$ мм. Схема питания умножителя и методика измерения его характеристик аналогична описанной в работе [30].

При настройке модулирующего каскада на частоту генератора входного сигнала на выходе умножителя зарегистрированы колебания, соответствующие четырехкратному $k_f = 4$ на длинах волн $\lambda_4 = 7,64 - 8,47$ мм и пятикратному $k_f = 5$ на длинах волн $\lambda_5 = 6,63 - 6,70$ мм умножению частоты при соответствующей настройке на соответствующий резонанс каскада отбора мощности (рис. 19).

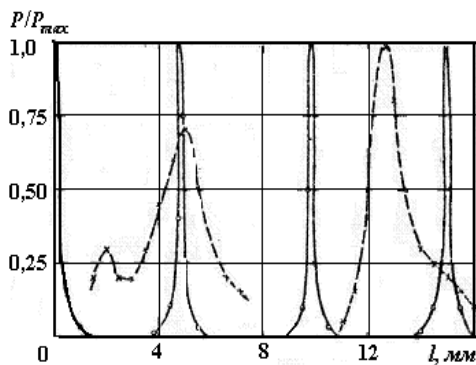


Рис. 19. Кривые резонансов в призматическом резонаторе при изменении расстояния l между "гребенкой" и подвижной диафрагмой

На рис. 19 показаны типичные зависимости относительной выходной мощности четвертой (P_4/P_{4max}) гармоники (сплошная кривая) и пятой (P_5/P_{5max}) гармоники (штриховая кривая) умножительного оротрона от положения диафрагмы-зеркала в волноводе на длинах волн $\lambda_4 = 8,3$ мм и $\lambda_5 = 6,65$ мм соответственно. В данном эксперименте применена подвижная емкостная диафрагма толщиной 0,1 мм со щелями сечением $0,3 \bullet 3$ мм² и $0,1 \bullet 3$ мм². Нагруженная добротность призматического резонатора со щелью $0,1 \bullet 3$ мм² была выше. Анализ результатов, представленных на рис. 19, показывает, что при четырехкратном умножении резонатор каскада отбора мощности возбуждается на колебаниях $H_{1,0,m}$ - типа, так как расстояние между максимумами с малой погрешностью соответствует половине длины волны в волноводе на колебаниях типа $H_{1,0}$. Первый максимум соответствует типу $H_{1,0,10}$ (расстояние между "гребенкой" и подвижной диафрагмой в этом эксперименте составляло 45 мм). Переход к генерации пятой гармоники сопровождается ухудшением добротности резонатора каскада отбора мощности и появлением более сложных типов колебаний в резонаторе, в частности $H_{2,0,m}$ (рис. 19).

На рис. 20 показаны зависимости относительной мощности гармоник $k_f = 4$ (сплошная кривая) и $k_f = 5$ (штриховая кривая) от величины ускоряющего напряжения. В обоих случаях мощность входного сигнала подбиралась оптимальной по максимуму выходного сигнала, причем мощность умножителя на указанных гармониках примерно одинакова. В максимумах кривых зависимости выходной мощности от напряжения [30] скорость электронного потока приблизительно равна скорости замедленной волны.

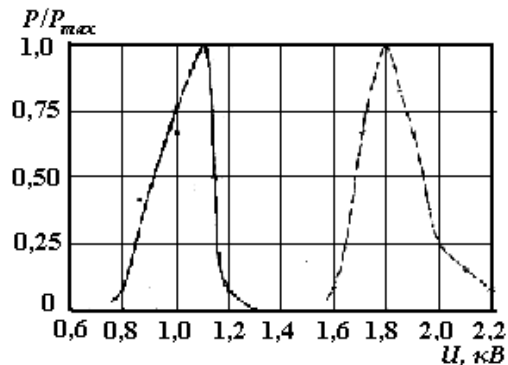


Рис. 20. Зависимость относительной величины мощности четвертой и пятой гармоник от величины рабочего напряжения

Это позволяет построить дисперсионную характеристику ЗС - "гребенки" оротронного умножителя и сравнить ее с характеристиками умножительного клинотрона, имеющего такую же ЗС "гребенку".

На рис. 21 показаны названные характеристики: кривая 1 - соответствует результатам, полученным с помощью умножительного клинотрона [30]; результаты, полученные с помощью умножительного оротрона с призматическим резонатором представлены на кривой 2 для $k_f = 4$, на кривой 3 для $k_f = 5$. Из рис. 21 видно, что полученные в данном исследовании результаты хорошо соответствуют работе прибора на колебаниях 2π -вида и соответствуют условиям, в которых наблюдается дифракционное излучение Смита-Парселла [19]

$$\lambda = D\left(\frac{c}{v} - \cos \theta\right), \quad (11)$$

где c - скорость света в свободном пространстве; v - скорость электронного потока; D - период "гребенки"; λ - длина волны излучения; θ - угол между направлением движения электронного потока и направлением распространения фронта волны излучения, возбуждаемого гармоникой тока. Экспериментально испытанный умножитель частоты миллиметрового диапазона, содержащий каскад отбора мощности - "гребенку" в призматическом резонаторе, является источником дифракционного излучения Смита-Парселла, т. е. умножительным оротроном с выходной мощностью в несколько милливольт [33].

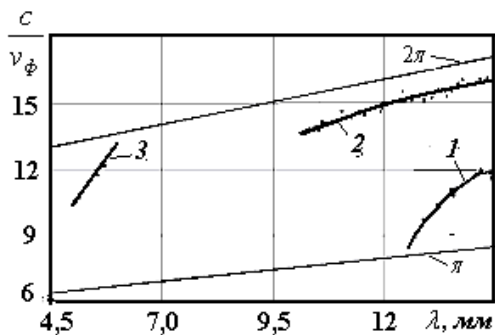


Рис. 21. Дисперсионная характеристика "гребенки" в призматическом резонаторе и характеристики умножительного оротрона на четвертой (кривая 2) и пятой (кривая 3) гармониках

Представляют интерес результаты экспериментальных исследований оптимального угла наклона плоскости симметрии ленточного электронного потока к рабочей поверхности "гребенки" при работе приборов в режиме ЛОВО клинотрона - генератора, умножительного клинотрона (оротрона) и умножительного клинотрона (оротрона), работающего в режиме автоколебаний

каскада отбора мощности, синхронизированного гармоникой тока.

Из результатов измерений, представленных на рис. 22 видно, что из режима 1 автоколебаний ЛОВО клинотрона можно перейти в режим автоколебаний с синхронизацией гармоникой тока (режим синхронного умножения) 3 или в режим умножения 2 путем изменения угла φ наклона плоскости симметрии ленточного электронного потока к рабочей поверхности "гребенки". Максимальная мощность выходного сигнала в указанных режимах работы умножительного клинотрона (оротрона) достигается только при оптимальном клинотронном угле φ .

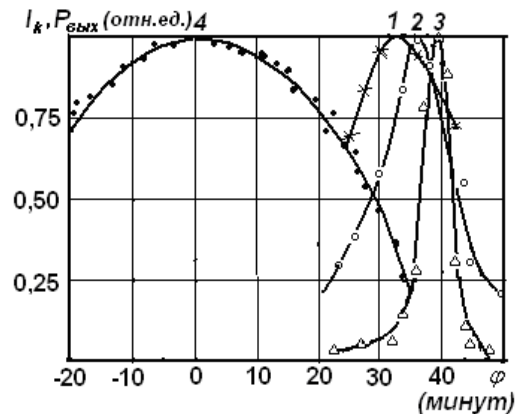


Рис. 22. Зависимость оптимального "клинотронного" угла φ от режима работы прибора с наклонным электронным потоком: 1 - ЛОВО клинотрон-автогенератор; 2 - умножительный клинотрон в режиме заданного тока; 3 - ЛОВО клинотрон-автогенератор, синхронизированный гармоникой тока

8. Многопучковые умножительные оротроны с наклонными электронными пучками. В 1969 г. был предложен источник субмиллиметровых волн на основе умножительного оротрона. Известно, что амплитуда замедленной волны ЗС типа "гребенка" экспоненциально уменьшается с удалением от её рабочей поверхности, причем тем сильнее, чем меньше её период. Поэтому при снижении фазовой скорости волны, распространяющейся в периодической структуре, уменьшается величина её амплитуды, действующей на электронный поток, что приводит к уменьшению КПД электронно-волнового взаимодействия. Влияние этого явления на эффективность энергообмена между электронами и волной в устройстве (рис. 17) скомпенсировано тем, что пучок направлен под острым углом φ к рабочей поверхности "гребенки". По разработанной в последние годы методике оптимизации закона изменения фазовой скорости волны вдоль "гребенки" оротрона на основе аппарата атомарных функций источник субмиллиметровых волн,

созданный по такой схеме, может обеспечить преобразование частоты с высоким КПД [52].

Увеличивать мощность выходного сигнала умножительного оротрона субмиллиметрового диапазона волн можно двумя способами. Один из них сводится к увеличению рабочего тока прибора за счет увеличения плотности тока в пучках и удельных нагрузок на эмиттер электронов. В этом случае на эффективность взаимодействия электронов и высокочастотного поля существенно влияет величина кулоновских сил пространственного заряда. Кроме того, этот путь сопровождается уменьшением срока безотказной работы эмиттера электронов и прибора в целом.

Характерным для другого способа является применение в электровакуумных источниках коротковолновых диапазонов пространственно развитых эмиттеров электронов, коллекторов отработавших заряженных частиц и ЭОС, формирующих пространственно развитые, в частности, многопучковые ленточные электронные потоки, которые синхронно взаимодействуют с волнами высокочастотного поля периодических ЗС резонансной электродинамической системы. При этом каждый электронный пучок взаимодействует с высокочастотным полем электродинамической системы, перемещаясь в индивидуальном распределенном пространстве взаимодействия в виде, например, канала ЗС, образованной двояными "гребенками". Практика применения пространственно развитых (в частности, многопучковых) электронных потоков в пролетных клистронах дециметрового и сантиметрового диапазонов возникла в 1940-х гг. и успешно развивается более 60 лет. Геометрия тороидальных резонаторов ограничивает возможность применения многопучковых электронных потоков в клистронных приборах коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

Разработка принципов построения эффективных генераторов, усилителей и преобразователей миллиметровых и субмиллиметровых волн с пространственно развитыми электродинамическими системами и электронными потоками на основе орботронов - перспективный путь решения задач, связанных с созданием малогабаритных нерелятивистских источников средней мощности в коротковолновых диапазонах волн. Орботрон - производное от слов *open resonator*, *binary comb*, *O-type*, *electron*. Данные о результатах исследования многопучковых генераторов электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн с пространственно развитыми электродинамическими системами представлены в работах [50, 51, 54].

При укорочении рабочей длины волны λ генераторов СВЧ с распределенным взаимодействием геометрические размеры элементов их

периодических ЗС, определяющих рабочую частоту источника излучения уменьшаются пропорционально λ . Для достижения эффективного взаимодействия электронов с электромагнитными волнами в ЗС в этом случае необходимо уменьшить рабочее напряжение пропорционально λ^2 . В то же время для сохранения величины мощности выходного сигнала (при неизменном КПД) необходимо увеличить рабочий ток пучка более чем в λ^2 раз. При этом микроперванс $p = I/V^{3/2}$ пучка (I - ток пучка в миллиамперах, V - ускоряющее напряжение в вольтах) возрастает не менее чем в λ^5 раз. Эффективным способом уменьшения действия кулоновских сил пространственного заряда является применение пространственно развитых ЭОС, формирующих N электронных пучков с уменьшенным примерно в N раз микропервансом в каждом из них. N -пучковый электронный поток взаимодействует с высокочастотным полем ОР, двигаясь в N каналах [54].

Пространственно развитая электродинамическая система нерелятивистских оротронов ГДИ и ледатронов, выполненная в виде двухзеркального ОР типа Фабри-Перо или коаксиального, открыла новые возможности для возбуждения в ней автоколебаний с помощью пространственно развитых, например, многопучковых или трубчатых электронных потоков. Для упомянутых приборов характерным является длительное распределенное взаимодействие волн пространственного заряда (плазменных волн) электронных потоков и электромагнитных волн.

В приборах на эффекте Вавилова-Черенкова-Смита-Парселла синхронизм взаимодействия пучков с волной электромагнитного поля (резонанс) достигается путем увеличения (уменьшения) момента количества движения (волнового числа) электромагнитной волны в ЗС (отражательной дифракционной решетке). Можно указать несколько факторов, ограничивающих электронный КПД оротронов традиционной конструкции:

- относительно слабая связь объемных волн ОР с поверхностной волной отражательной дифракционной решетки, используемой в качестве ЗС;
- экспоненциальное уменьшение в такой ЗС амплитуды поля поверхностной волны, взаимодействующей с ленточным электронным потоком, по его поперечному сечению;
- неоптимальное распределение амплитуды поля поверхностной волны при симметричном расположении ЗС относительно оси симметрии ОР;

- использование регулярной ЗС - отражательной дифракционной решетки, не позволяющей реализовать оптимальную фазировку электронов и эффективный отбор энергии от ленточного электронного потока вдоль пространства взаимодействия.

Первые три проблемы решены в конструкции многопучкового нерелятивистского орботрона, описанной в работах [49-50]. Результаты решения четвертой проблемы, связанной с обеспечением оптимального по КПД управления динамическим процессом взаимодействия в многопучковых орботронах путем оптимизации параметров ЗС, в частности, регулярной и нерегулярной сдвоенных "гребенок", представлены в работах [50-52]. Задача оптимального управления процессом электронно-волнового взаимодействия в многопучковом орботроне решена на основе теории атомарных функций [55].

При сравнении характеристик многопучковых нерелятивистских орботронов и однопучковых оротронов ГДИ следует отметить преимущество первых. Они обеспечивают увеличение электронного КПД, мощности выходного сигнала, уменьшение рабочего магнитного поля и ускоряющего рабочего напряжения и, как следствие, уменьшение массы и габаритов источника излучения при прочих равных условиях.

На рис. 23 показана схема двухкаскадного источника субмиллиметровых волн - многопучкового умножительного орботрона - лампы дифракционного излучения с двумя ОР [52], в которой применена ЭОС 1, формирующая многопучковый электронный поток 2. Если сравнивать данную

лампу с умножительным оротроном, то в модулирующем каскаде применен ОР, образованный зеркалами 3 и 4 с системой сдвоенных "гребенок" 3 вместо клистронного группирователя, а в каскаде отбора мощности также применен ОР с зеркалами 8, 10 и системой сдвоенных "гребенок", наклоненных под острым углом φ к плоскостям симметрии ленточных пучков 2. Умножительный орботрон имеет устройства настройки колебательных систем первого 5, 6 и второго 11, 12 каскадов на резонанс. Так как сдвоенные "гребенки" каскада отбора мощности многопучкового умножительного орботрона совмещены с коллектором электронов, то их температурный режим работы регулируется с помощью системы жидкостного охлаждения. В модулирующем каскаде умножительного орботрона с наклонными электронными пучками можно применять как регулярные сдвоенные "гребенки", так и нерегулярные. Торцовые щели сдвоенных "гребенок" (рис. 23), выполненные на рабочей поверхности зеркала 3 и 8, являются щелями связи с полем объемов ОР. Вследствие симметрии ЗС сдвоенных "гребенок" относительно плоскости симметрии ленточных пучков распределение продольной компоненты E -поля в области пучков квадратично. Поэтому динамическое расслоение в достаточно толстом ленточном пучке не возникает в отличие от традиционных оротронов ГДИ или ледатронов. Высокодобротные ОР определяют фазу колебаний на "полуволновых" щелевых резонаторах сдвоенных "гребенок". Колебания в щелевых резонаторах сдвоенных "гребенок" синфазны.

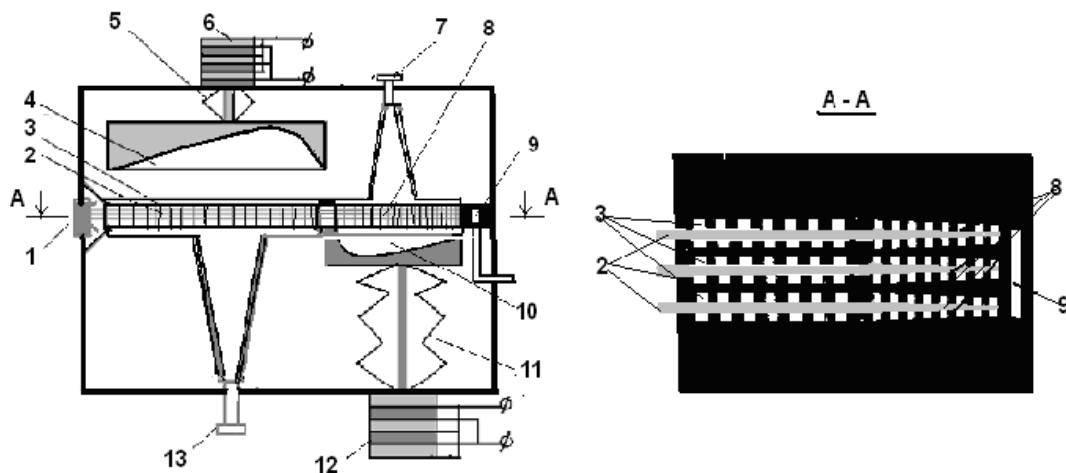


Рис. 23. Схематическое изображение многопучкового умножительного орботрона с наклонными пучками в каскаде отбора мощности.

Проведено численное моделирование модуляционных и энергетических характеристик умножительных орботронов с регулярными и нерегулярными сдвоенными "гребенками" с уче-

том действия кулоновских сил пространственного заряда в электронных пучках, которые подтверждают целесообразность проведения физического эксперимента на лабораторных макетах таких

устройств. На рис. 24 показаны зависимости фазовой скорости $v_{ph} = \text{const}$, распределения амплитуды высокочастотного поля Ag вдоль про-

странства взаимодействия T , функции группировки Gr первой гармоники тока и электронный КПД.

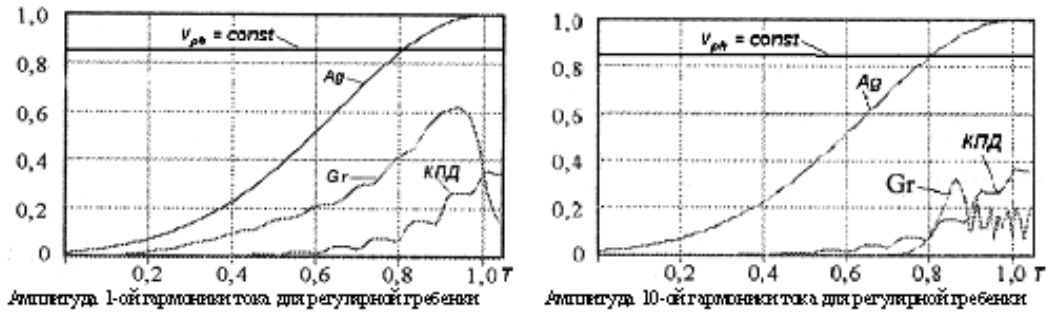


Рис. 24. Интегральная характеристика динамики электронно-волнового взаимодействия на первой и десятой гармонике в умножительном орбтроне при использовании регулярных двоянных "гребенок" в модулирующем каскаде и каскаде отбора мощности

На рис. 25 графически представлены результаты численного моделирования модуляционных и энергетических характеристик умножительного орбтрона, в котором как в модулирующем каскаде, так и в каскаде отбора мощности применены нерегулярные двоянные "гребенки". Из рис. 24 и 25 видно, что амплитуда десятой гармоники тока в случае применения в умножительном орбтроне регулярных двоянных "гребенок" превышает 30% величины рабочего тока умножителя. При использовании в многопучковом умножительном орбтроне нерегулярных двоянных "гребенок" амплитуда двадцатой гармоники составляет около 30% рабочего тока умножителя. Элек-

тронный КПД электронно-волнового взаимодействия составляет около 50%. Применение клинотронного эффекта при взаимодействии гармоник тока в каскаде отбора мощности будет способствовать улучшению представленных параметров Многопучковые умножительные орбтроны могут быть реализованными как для работы в неавтономном режиме (режим умножения частоты), так и в автономном режиме (режим генерации электромагнитного излучения коротковолновых диапазонов). Названные умножительные приборы обеспечивают перенос высокой стабильности частоты в субмиллиметровую область спектра из более длинноволновых диапазонов.

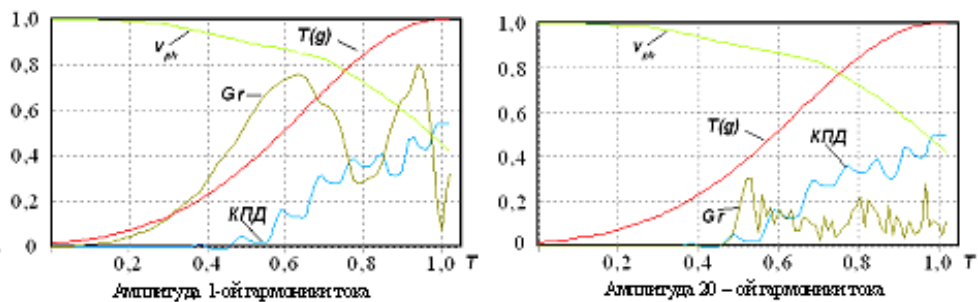


Рис. 25. Интегральная характеристика динамики электронно-волнового взаимодействия на первой и двадцатой гармонике в умножительном орбтроне при использовании нерегулярных двоянных "гребенок" в модулирующем каскаде и каскаде отбора мощности

Выводы. Результаты экспериментальных и теоретических исследований показывают, что умножительные клинотроны, умножительные оротроны с наклонным электронным потоком, а также многопучковые умножительные орбтроны с наклонными электронными пучками являются вакуумными нерелятивистскими источниками электромагнитного излучения пригодными для освоения субмиллиметрового диапазона волн. Многопучковые умножительные орбтро-

ны открывают возможность получения выходной мощности десятков и сотен милливольт в интервале частот 0,3 - 3,0 ТГц.

1. Van Iperen B. B., Kuypers W. A klystron multiplier for generating 0,8 mm waves. // Philips Technical Review. - 1965. - 26, N3. - P.61-65.
2. Van Iperen B. B., Kuypers W. Experimental CW klystron multiplier for submillimetre waves // Philips Res. Reports. - 1965. - 20. - P.462-468.

3. *Milcho M. V., Yephimov B. P., Yeryomka V. D.* Two-stage oscillators of submillimeter waves // Proc.SPIE, 1994. - 2250. - P.235-236.
4. *Yeryomka V. D., Yeryomka D. V., Kulagin O. P.* The orotron-similar FEL - source of submillimeter waves // International Vacuum Electronics Conference (IVEC'2001)/ Conf. Dig. Noordwijk, Netherlands. - 2001. - P.139-140.
5. Миллиметровые и субмиллиметровые волны / Под ред. П. Г. Мириманова. - М.: Изд-во иностр. лит., 1959. - 607с.
6. *Koch M.* Terahertz technology: Quo vadis? // Photonik international. - 2006. - P.14-17.
7. *Woolard D., Kaul R., Suenram R. et al.* Terahertz electronics for chemical and biological warfare agent detection. // IEEE MTT-S Dig. - 1999. - P.925-928.
8. *Piesiewicz R.* THz channel characterization for future wireless gigabit indoor communication systems, in Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics IV. R. J. Hu and K. J. Linden (eds). // Proceedings of SPIE. - 2005. - 5727. - 166 p.
9. *Manley J. M., Rowe H. F.* General energy relations in nonlinear reactances // Proc. IRE, 1959. - 47, N12. - P.2115-2116.
10. *Guenard P., Doehler O., Epsstein B., Warnecke R.* Nouveau Tubes Oscillateurs a Large Bande d'accord onique pour Hyperfrequencies // C.R. Acad. Sc. - 1952. - 235. - 236 p.
11. Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / Е. М. Гершензон, М. Б. Голант, А. А. Негирев, В. С. Савельев. Под ред. Н. Д. Девяткова. - М.: Радио и связь, 1985. - 136 с.
12. *Barnet L. R., Baird J. N., Grow R. W. and Holmes S. G.* Submillimeter-Wave BWO's // IEEE Int. Electron Devices Meeting. San Francisco, CA. Technical Digest. - 1985. - P.364-365.
13. *Barnet L. R., Stankiewicz N., Dayton J. A. Jr.* Submillimeter Backward-Wave Oscillator // IEEE Int. Electron Devices Meeting. San Francisco, CA. Technical Digest. - 1990. - P.341-342.
14. Клинетрон / Г. Я. Левин, А. И. Бородкин, А. Я. Кириченко и др. Под ред. А. Я. Усикова. - Киев: Наук. думка, 1992. - 200 с.
15. *Кириченко А. Я.* Влияние пульсаций границы электронного потока на пусковые характеристики ЛОВ // Тр. ИРЭ АН УССР. - Харьков. - 1965. - 12. - С.162-168.
16. *Кириченко А. Я.* О факторах, ограничивающих возможности укорочения длины волны ЛОВО с диодной пушкой // Тр. ИРЭ АН УССР. - Харьков. - 1968. - 15. - С.96-103.
17. *Ives L., Kory C., Read M. et al.* Development of Terahertz Backward Wave Oscillators // International Vacuum Electronics Conference (IVEC'2004)/ Conf. Dig. Monterey, CA, USA (27-29 April 2004). - 2004. - P.68-69.
18. *Dayton J. A. Jr., Mearini G. T., Kory C. L.* Diamond Based Sub Millimeter Backward Wave Oscillator // International Vacuum Electronics Conference (IVEC'2004)/ Conf. Dig. Monterey, CA, USA (27-29 April 2004). - 2004. - P.71-72.
19. *Smith S. J., Purcell E. M.* Visible light from free electron localized surface charges moving across a grating // Phys. Rev. - 1953. - 92, N4. - P.1069-1073.
20. *Черепенин В. А.* Релятивистские многоволновые генераторы и их возможное применение // Успехи физ. наук. - 2006. - 176, №10. - С.1124-1130.
21. *Гапонов А. В.* Теоретическое и экспериментальное исследование индуцированного циклотронного излучения, приведшее к созданию нового класса электронных приборов - мазеров на циклотронном резонансе // Квантовая электроника. - 1974. - №5. - С.1015-1017.
22. Application of High-Power Microwaves / A. V. Gaponov-Grekhov, V. L. Granatstein, Eds. Norwood, MA: Artech House, 1994. - 200 p.
23. *Братман В. Л., Кальнов Ю. К., Мануилов В. Н. и др.* Релятивистский гиротрон на высоких циклотронных гармониках // Радиотехника и электроника. - 2001. - 46, №6. - С.744-751.
24. *Голеницкий И. И., Ерёмка В. Д., Сазонов В. П.* Электровакуумные источники миллиметровых и субмиллиметровых волн на гармониках циклотронной частоты // Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. Вып.14 (1401). - М.: ЦНИИ "Электроника", 1988. - 88 с.
25. *Ерёмка В. Д., Жураховский В. А., Шестопалов В. П.* Высокоорбитальный пениотрон со сквозным гирорезонансом // Радиотехника и электроника. - 1989. - 34, №9. - С.1900-1907.
26. *Ishihara T., Sagae K., Sato N. et al.* Highly Efficient Operation of Space Harmonic at Cyclotron High Harmonics // IEEE Trans. On Electron Devices. - 1999. - 46, N4. - P.798-802.
27. *Ерёмка В. Д., Кураев А. А., Сеницын А. К., Щербаков А. В.* Оптимизация параметров резонансного пениотрона на 10-й гармонике гирочастоты // Радиотехника и электроника. - 2000. - 45, №3. - С.357-361.
28. А.с. 50354. СССР. М.кл. H01J 25/10. Умножительный клинетрон миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / В. Д. Ерёмка, Л. А. Поспелов, А. Я. Кириченко // Открытия. Изобретения. - 1970. - №4. - 129 с.
29. *Ерёмка В. Д., Кириченко А. Я., Поспелов Л. А., Процай В. Ф.* Умножительный твистрон // Тр. ИРЭ АН УССР. - Харьков. - 1970. - 18. - С.106-121.
30. *Ерёмка В. Д., Кириченко А. Я., Поспелов Л. А.* Экспериментальное исследование твистронного умножителя // Тр. ИРЭ АН УССР там же. - 1970. - 18. - С.122-137.
31. *Ерёмка В. Д., Кириченко А. Я.* Экспериментальное исследование миллиметрового умножителя частоты с высоким коэффициентом умножения // Тр. ИРЭ АН УССР там же. - 1970. - 18. - С.138-148.
32. А.с. 59810. СССР. М.кл. H01J 25/10. Умножительный оротрон миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / В. Д. Ерёмка, Л. А. Поспелов, А. Я. Кириченко // Открытия. Изобретения. - 1971. - №46. - 169 с.
33. *Ерёмка В. Д., Ефимов Б. П., Касьяненко А. П. и др.* Возбуждение замедляющей системы в призматическом резонаторе на нулевом виде колебаний // Тр. ИРЭ АН УССР. - Харьков. - 1970. - 18. - С.149-158.
34. *Силин Р. А., Сазонов В. П.* Замедляющие системы. М.: Сов. радио, 1966. - 558 с.
35. *Парыгин В. Н.* Излучение электронных сгустков над дифракционной решеткой // Изв. вузов. Радиофизика - 1958. - 1, №5/6. - С.139-147.
36. *Bradshaw J. A.* A millimeter wave multiplier using the Purcell radiator // Proc. of the Symposium. on millimeter waves, Polytech. Press, New York. - 1959. - 9. - P.223-231.
37. *Ishiguro K., Tako T.* An estimation of Smith-Purcell effect as a light source in the infra-red-region // Optica Acta. - 1961. - 8, N1. - P.25-28.
38. *Русин Ф. С., Богомолов Г. Д.* Оротрон - электронный прибор с открытым резонатором и отражающей решеткой // Изв. вузов, "Радиофизика". - 1968. - 11, №5. - С.756-762.
39. *Балаклицкий И. М., Скрынник Б. К., Третьяков О. А., Шестопалов В. П.* Генератор дифракционного излучения воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов // Укр. физ. журн. - 1969. - 14, №4. - С.539-552.
40. *Богомолов Г. Д., Бородкин А. И., Куц В. С. и др.* О возбуждении "гребенки" в открытом резонаторе в режиме оротрона и режиме ЛОВ // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. - 1970. - №1. - С.97-102.
41. *Балаклицкий И. М., Курин В. Г., Скрынник Б. К.* О работе ГДИ в режиме ЛОВ // Укр. физ. журн. - 1970. - 15, №5. - С.717-724.
42. *Mizuno K., Ono S., Shibata Y.* Two different mode interaction in an electron tube with a Fabry-Perot resonator - the ledatron // IEEE Trans. Electron Devices. - 1973. - ED-20, N8. - P.749-752.
43. *Ерёмка В. Д., Кириченко А. Я.* Использование высших типов колебаний "гребенки" при умножении частоты в миллиметровом диапазоне // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. - 1971. - №12. - С.31-38.
44. *Ерёмка В. Д.* Умножительный твистрон субмиллиметрового диапазона // Научная сессия, посвященная Дню радио и Дню связиста. Тез. докл. - М. -1972. -С.18.

45. Еремка В. Д., Кириченко А. Я., Лысова Л., Процай В. Ф. Исследования синхронизации миллиметровых ЛУОВО гармоникой трехсантиметрового сигнала // Тр. ИРЭ АН УССР. - 1974. - 22. - С.25-25.
46. Поспелов Л. А., Усиков А. Я. Приборы СВЧ с гармонизированным электронным потоком // Укр. физ. журн. - 1970. - 15, №5. - С.764-768
47. Гребенчук В. А., Поспелов Л. А., Процай В. Ф. Теория умножительного твистрона. Часть I. Приближение заданного тока // Радиотехника. - 1971. - Вып.19. - С.82-89.
48. Гребенчук В. А., Поспелов Л. А., Процай В. Ф. О предельном значении КПД умножительного твистрона // Радиотехника. - 1971. - Вып.18. - С.72-76.
49. А.с. 830946 (СССР). М.кл. Н01 J 25/00. Генератор дифракционного излучения / В. Д. Еремка, А. В. Стадник, В. П. Шестопапов // Открытия. Изобретения. - 1982, - №5. - С.109.
50. Еремка В. Д., Кравченко В. Ф., Кураев А. А. и др. Атомарные функции в задаче оптимизации по КПД двухпучкового оротрона с нерегулярной сдвоенной "гребенкой" // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектрон. - 2000, №3. - С.58-62.
51. Еремка В. Д., Кураев А. А., Сеницын А. К. Орботроны-многопучковые генераторы миллиметровых и субмиллиметровых волн // Тр. 14-й международн. Крымской конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2004). - 2004. - С.199-202.
52. Yeryomka V. D., Gurevich A. V., Sinityn A. K. A millimeter-wave two-stage orotron // Proc. Seventh IEEE Int. Vacuum Electron, Conf. and Sixth IEEE Int. Vacuum Electron, Sources Conf. (IVEC-IVESC'2006), Monterey, CA, USA. - 2006. - P.199-200.
53. Еремка В. Д., Кураев А. А., Сеницын А. К. Оптимизация фазовой скорости волны в оротроне миллиметрового диапазона с наклонным электронным потоком // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2007. - 12, спец. вып. - С.81-103.
54. Еремка В. Д. Генерирование и усиление миллиметровых волн многолучевыми и трубчатыми электронными потоками // Тр. 5-й международн. Крымской конф. "СВЧ техника и спутниковые телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'1995). - Севастополь. - 1995. - 1. - С.52-61.
55. Кравченко В. Ф. Лекции по атомарным функциям и их применению. - М.: Радиотехника, 2003. - 470 с.
56. King G., Solimar L., Ait E. A. Экспериментальное исследование нелинейных явлений в электронных потоках на основной частоте и её гармониках // Тр. IV международн. конгресса по приборам СВЧ. - 1962. - 2. - С.45-49.

INCLINED-ELECTRON FLOW FREQUENCY MULTIPLIER

V. D. Yeryomka

In recent year greater interest has been shown in the terahertz range, and this is clearly evidenced by an ever-growing amount of scientific publications dedicated to that particular issue. The present paper is concerned with the possibilities to use the fre-

quency multiplication principles in designing the vacuum electromagnetic radiation sources featured by an inclined electron flow in the short-wave bands including the terahertz range. The paper outlines the results from simulation and experimental studies of millimeter-wave frequency multipliers, particularly, multiplier klynotrons, multiplier orotrons and multiplier orbotrons that offer great frequency multiplier factors $k_f = 15$. The findings of the experimental investigations into the millimeter-wave frequency multiplier are described in which the electrodynamic system serving as a prismatic "comb-type" periodic-structure resonator is a power take-off cascade. The electrodynamic system was triggered at higher-mode oscillations. It is shown that the power take-off cascade can be operated over a frequency range far exceeding an octave, which provides for the frequency conversion factor of over 10. Energy and frequency characteristics of the frequency multiplier are given. It was experimentally confirmed that circuitry devices construction described above hold a good deal of promise in terms of developing the electromagnetic radiation source whose frequency is tunable in the terahertz range.

Key words: klynotron, orotron, orbotron, millimeter wave range, terahertz range.

ПОМНОЖУВАЧІ ЧАСТОТИ ІЗ ПОХИЛИМ ЕЛЕКТРОННИМ ПОТОКОМ

В. Д. Єрьомка

В останні роки діапазон терагерцевих (ТГц) частот викликає підвищений інтерес, зокрема в науковій літературі. У статті обговорюється можливість застосування принципу множення частоти при побудові вакуумних джерел електромагнітного випромінювання з похилим електронним потоком у короткохвильових діапазонах, у тому числі й у діапазоні ТГц. Описано результати моделювання та експериментальних досліджень помножувачів частоти міліметрового діапазону, зокрема помножувальних клинотронів, помножувальних оротронів та помножувальних орботронів з високими коефіцієнтами множення частоти $k_f = 15$. Описано результати експериментального дослідження помножувача частоти міліметрового діапазону, каскадом відбору потужності якого слугує електродинамічна система у вигляді призматичного резонатора із періодичною сповільнюючою структурою типу "гребінка". Електродинамічна система збуджувалась на вищих типах коливальних. Показано можливість роботи каскаду відбору потужності такого помножувача в діапазоні частот, який перевищує октаву, що забезпечує коефіцієнт перетворення частоти більше 10. Приведено енергетичні і частотні характеристики помножувачів частоти. Експериментально підтверджена перспективність застосування описаних схем побудови для створення джерел електромагнітного випромінювання з перебудовою частоти в діапазоні ТГц.

Ключові слова: клінотрон, оротрон, орботрон, помножувачі частоти, міліметровий діапазон хвиль, діапазон терагерц.

Рукопись поступила 26 марта 2007 г.