

В. Д. Еремка, А. А. Кураев*, А. К. Синицын*

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

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

**Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*

6, ул. П. Бровки, Минск, 220027, Беларусь

ОРБИКТРОН-ГЕНЕРАТОР: МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА В ДИАПАЗОНЕ 180 ГГц

Источники субмиллиметрового диапазона востребованы при решении многих технических задач: при сканировании багажа, фотографировании опухолей, радиолокации, в системах связи между большими быстродействующими ЭВМ. Они должны обеспечивать генерирование выходной мощности 1...50 Вт при использовании экологически безопасных низковольтных электронных потоков. Среди источников электромагнитного излучения миллиметрового диапазона перспективным для генерирования субмиллиметровых волн является модификация оротрона, в которой для замедления волн вместо плоской отражательной дифракционной структуры применена сдвоенная плоская гребенка. Такую модификацию генератора назвали орбитроном. Важными факторами, которые приводят к снижению его эффективности при повышении рабочей частоты, являются эффект расслоения ленточного электронного потока, ограничение амплитуды высокочастотного поля в прямоугольном канале взаимодействия электронов и электромагнитных волн вследствие необходимости использования открытого резонатора с предельно большой нагруженной добротностью. Выявлен эффект резонанса в сдвоенной гребенке орбитрона, при котором амплитуда высокочастотного поля в зоне взаимодействия электронов и волн в прямоугольном канале в несколько раз превосходит амплитуду поля в объеме между рабочими поверхностями зеркал открытого резонатора. Этот эффект принципиально изменяет оценку необходимой величины добротности резонансной системы орбитрона и позволяет решить проблему ограничения амплитуды. Использование пространства взаимодействия в виде канала для ленточного электронного потока, образованного рабочими поверхностями сдвоенной гребенки, которые сходятся клином, обеспечивает решение проблемы расслоения ленточных электронных потоков. С использованием разработанной математической модели проведен оптимизационный поиск перспективных вариантов конструкции орбитрона-генератора в диапазоне 180 ГГц, с рабочим напряжением электронного потока 3,5 кВ и рабочим током 0,1 А. Найдены варианты генератора с КПД 10...12 % при добротностях, которые не превышают 1 000. Показано, что за счет применения клинотронного эффекта в орбитроне-генераторе (клинорбитрон) его КПД возрастает до 14 %, а добротность резонатора уменьшается в три раза. Полученные результаты указывают на перспективность орбитрона и его модификации клинорбитрона как источников электромагнитного излучения терагерцевого интервала частот. Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 19 назв.

Ключевые слова: оротрон, орбитрон, генератор, терагерцевый диапазон, математическое моделирование.

Генерация и усиление электромагнитных волн в терагерцевом (ТГц) диапазоне частот ($f \sim 0,1 \dots 1,0$ ТГц) с использованием низковольтных электронных потоков в настоящее время является одной из наиболее трудных проблем современной радиофизики. В то же время источники ТГц диапазона особенно востребованы в технических приложениях. Такие источники должны обеспечивать генерирование выходного сигнала $P_{out} = 1 \dots 50$ Вт и использовать экологически безопасные низковольтные электронные пучки с напряжением $U_0 < 10$ кВ [1–4].

Как показывает анализ, увеличение рабочей частоты при снижении скорости электронов в традиционных конструкциях генераторов и усилителей О-типа (со спиральными замедляющими периодическими структурами, а также на основе цепочки связанных резонаторов (ЦСР)) влечет за собой миниатюризацию их конструкции с тонкими пространственно неразвитыми цилиндрическими электронными потоками. Освоение ТГц интервала частот вакуумными источниками электромагнитного излучения осуществляется более эффективно при возбуждении и усилении сигналов пространственно развитыми электронными потоками, например ленточными, трубчатыми [5]. Естественное сопряжение с ленточными электронными потоками имеет замедляющая пе-

риодическая структура – гребенка и ее модификации, например сдвоенная гребенка [6].

Хорошую перспективу для освоения ТГц интервала частот имеют приборы с нерелятивистским ленточным электронным потоком, которые хорошо себя зарекомендовали при освоении миллиметрового диапазона длин волн, в частности клинотрон [5, 7], оротрон и его модификации [8–12]. В оротроне применен открытый резонатор (ОР), на одном из зеркал которого выполнена плоская гребенка с периодической последовательностью резонансных полостей, имеющих четвертьволновую глубину. При протекании вблизи рабочей поверхности гребенки тонкого ленточного электронного потока в ОР возбуждается индуцированное излучение Смита-Парселла. Теоретические расчеты процесса взаимодействия «тонкого» ленточного электронного потока с высокочастотным (ВЧ) электромагнитным полем замедленной волны вблизи гребенки показывают, что оротрон с регулярной гребенкой обеспечивает электронный КПД 40 %, а оротрон с нерегулярной гребенкой и наклоненным к ее рабочей поверхности под острым углом ленточным электронным потоком обеспечивает электронный КПД 70 % [13]. Однако, как показали результаты экспериментальных исследований, в оротронах с низковольтными ($U_0 \sim 4,5$ кВ) ленточными элект-

ронными потоками даже в 8-мм диапазоне КПД не превышал 2,5 % [9].

Как отмечено в ряде работ, основным ограничивающим электронный КПД фактором в оротроне с низковольтным и, следовательно, маломощным потоком является невысокий коэффициент использования ленточного электронного потока из-за отсутствия возможности обеспечить требуемое значение амплитуды замедленной волны ВЧ-поля, действующего на электронные слои по толщине ленты. Для этого требуется обеспечить нагруженную добротность ОР не меньше 5 000, в то время как типичное значение собственной добротности таких резонаторов 2 000–5 000.

Вторым фактором, приводящим к ограничению электронного КПД с увеличением рабочей частоты таких генераторов, является эффект расслоения ленточного потока из-за того, что вблизи гребенки амплитуда замедленной синхронной волны экспоненциально уменьшается при удалении от ее рабочей поверхности. Для повышения коэффициента использования электронного потока и компенсации его расслоения в оротроне применены двухрядные замедляющие периодические структуры (ЗПС), между рабочими поверхностями которых протекает ленточный электронный поток.

В одном варианте двухрядная замедляющая периодическая структура представляет плоскую гребенку на рабочей поверхности неподвижного зеркала с расположенной над ней лестничной замедляющей структурой, а ленточный электронный поток, плоскость симметрии которого параллельна рабочей поверхности гребенки и перпендикулярна оси ОР, пропускают над гребенкой и под лестничной замедляющей периодической структурой, рабочая поверхность которой параллельна поверхности гребенки [9]. С помощью оротрона с такой ЗПС и ленточным электронным потоком с рабочими током $I_0 = 11,6$ А и напряжением $U_0 = 13$ кВ осуществлено генерирование электромагнитных колебаний на частоте $f = 10$ ГГц с КПД около 35 %, который близок к теоретически достижимому, при нагруженной добротности ОР $Q_H = 800$. Как показали дальнейшие исследования этой конструкции, при увеличении рабочей частоты до 94 ГГц для получения КПД 6 % потребовалось увеличить мощность пучка ($U_0 = 20$ кВ, $I_0 = 11,6$ А) при добротности $Q_H = 5 000$. Это свидетельствует о том, что при возрастании рабочей частоты на эффективность генератора влияет расслоение ленточного электронного потока, несмотря на частичную его компенсацию двухрядной ЗПС, и особенно недостаточная величина амплитуды ВЧ-поля в зоне его взаимодействия с электронами, обусловленная ограничением величины нагруженной добротности.

В другом варианте конструкции генератора дифракционного излучения с ОР ЗПС выполнена в теле его неподвижного зеркала и представляет собой сдвоенную плоскую гребенку, рабочие поверхности которой расположены зеркально симметрично в параллельных оси ОР плоскостях [11, 12]. В канале пространства взаимодействия электронов и электромагнитных волн между рабочими поверхностями сдвоенных гребенок протекает ленточный электронный поток, плоскость симметрии которого параллельна оси ОР. При этом одна боковая сторона сдвоенной гребенки открыта в полость между зеркалами ОР. В данной модификации генератора, названной орбитроном (сокращение от английских слов *open resonator, binary comb, electron*), как и в первом варианте модификации оротрона с двухрядной ЗПС [10], обеспечивается закон изменения высокочастотного поля по гиперболическому косинусу в поперечном сечении канала для ленточного электронного потока.

Такое расположение сдвоенной гребенки орбитрона позволяет улучшить связь объемной волны ОР с замедленной волной в сдвоенной гребенке. Ширина сдвоенной гребенки орбитрона [11–13] равна примерно половине длины волны в вакууме, что обеспечивает равенство амплитуд колебаний в ОР и в канале для электронного потока сдвоенной гребенки. Последующее развитие орбитрона показало, что такая конструкция генератора позволяет естественно решить как проблему оптимального профиля распределения интенсивности ВЧ-поля вдоль пространства взаимодействия в канале ленточного электронного потока [13], так и проблему взаимодействия между смежными ОР при небольшой длине области дрейфа в каскадной схеме усилителя, располагая подвижные зеркала ОР по разные стороны канала для ленточного электронного потока [14].

Несмотря на то что в описанных выше вариантах конструкций оротрона острота проблемы расслоения ленточного электронного потока в длинноволновой части миллиметрового диапазона уменьшена, основная проблема недостаточной величины амплитуды ВЧ-поля из-за ограниченной величины нагруженной добротности остается как в оротроне с двухрядной ЗПС, так и в орбитроне.

В работах [10, 15] описан эффект влияния резонанса в двухрядной ЗПС на повышение эффективности оротрона, автоколебания в котором возникают при токах, вдвое меньших, чем при обычном резонансе в ОР. Этот эффект указывает на то, что при резонансе в ЗПС амплитуда ВЧ-поля в пролетном канале выше, чем амплитуда поля в пространстве между зеркалами ОР.

Обнаруженный эффект резонанса в двоянной гребенке орбитрона описан в работах [16, 17]. В холодных измерениях наблюдалось пятикратное превышение амплитуды поля в канале ленточного электронного потока над амплитудой поля между зеркалами ОР [17]. На основе численных расчетов были найдены размеры двоянной гребенки орбитрона, при которых реализуется совместный резонанс в системе ОР – двоянная гребенка [16]. Оказалось, что в орбитроне резонанс наблюдается при ширине гребенки $1,5 \div 3\lambda$, при этом амплитуда поля в пространстве взаимодействия двоянной гребенки в 5–8 раз может превышать амплитуду поля в пространстве между зеркалами ОР. При таком резонансе более половины запасенной в резонансной системе ОР – двоянная гребенка энергии сосредоточено в двоянной гребенке. Этот факт принципиально меняет оценку требуемой нагруженной добротности резонансной системы, при которой обеспечивается необходимая амплитуда ВЧ-поля в канале для ленточного электронного потока орбитрона, и позволяет существенно повысить его эффективность при разумных значениях нагруженной добротности.

В настоящей статье описаны математическая модель и результаты исследования эффективных режимов орбитрона-генератора с резонансной гребенкой.

1. Принцип действия орбитрона-генератора. Схема резонансной системы орбитрона и двоянной гребенки с прямоугольными щелевыми резонаторами представлены на рис. 1 [16].

На рис. 1: 1 – открытый резонатор, 2 – согласующая резонансная канавка, 3 – периодическая структура прямоугольных резонаторов, связанных через щели 4 с ОР, 5 – ленточный электронный поток в прямоугольном канале. Канал (у-сечение периодической структуры, представленное на рис. 1, б) для ленточного электронного потока 5 ограничен параллельными рабочими поверхностями двух плоских гребенок. Вследствие небольшой ширины $2a$ канала для ленточного электронного потока 5 волна ВЧ-поля на рабочей частоте не распространяется вдоль двоянной гребенки. Ленточный электронный пучок 5, имеющий толщину $2b$ и ширину b_w , формируемый электронной пушкой 6, проходит в узком канале шириной $2a$ двоянной гребенки. Двоянная гребенка имеет ширину l_g и глубину h_g прямоугольных щелей. При выполнении условия синхронизма с замедленной в гребенчатой периодической структуре волной протекающий электронный поток возбуждает в полостях щелевых резонаторов гребенки и в ОР высокочастотное электромагнитное поле, после чего осаждается на коллекторе 7 (рис. 1, б).

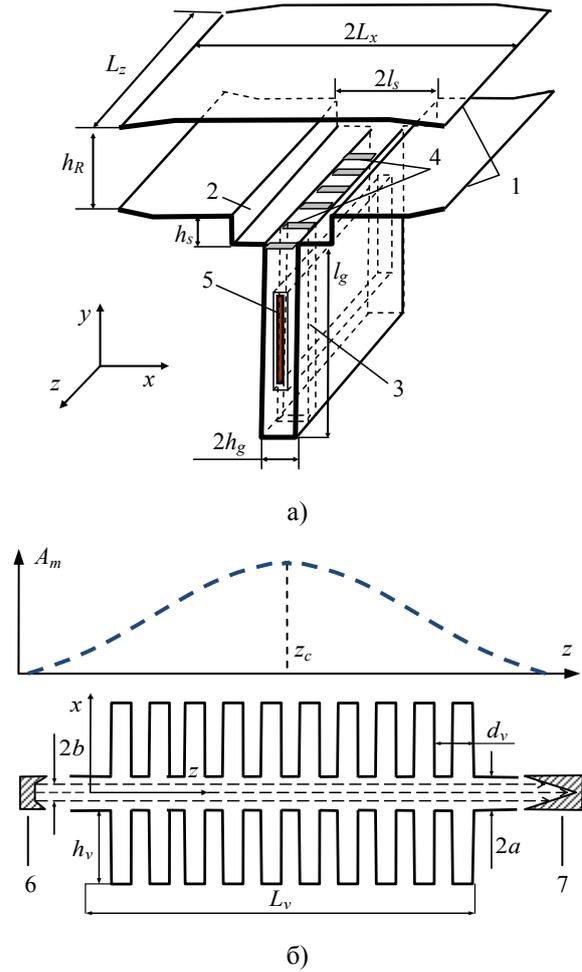


Рис. 1 Схема орбитрона

Далее будут использованы как размерные, так и безразмерные переменные. Все геометрические размеры нормированы на коэффициент $c/\omega_0 = \lambda_0/2\pi$, ω_0 – рабочая частота прибора (используется при переходе к безразмерным величинам), c – скорость света, λ_0 – длина волны, соответствующая выбранной частоте. Размерные величины, имеющие одинаковые обозначения с безразмерными помечаются штрихом. Например, $L'_z = L_z c / \omega_0$, $l'_g = l_g \lambda_0 / 2\pi$, $h'_g = h_g \lambda_0 / 2\pi$.

Двоянная гребенка на рис. 1 представляет систему прямоугольных резонаторов 3, связанных через дифракционные щели. При $2h'_g = 2(a' + h'_v) \approx \lambda/2$, $l'_g \approx (1 \div 3)\lambda$ в каждом таком резонаторе на рабочей частоте возбуждается мода E_{110} , амплитуда которой пропорциональна амплитуде колебаний поля ОР вблизи соответствующей щели связи 4. Поэтому вдоль пролетного канала устанавливается профиль амплитуды ВЧ-поля $A_m(z)$, пропорциональный распределению компоненты $E_z(z)$ в ОР (рис. 1, б). Изменяя положение центра верхнего зеркала z_c относительно

гребенки, можно задавать требуемый профиль амплитуды ВЧ-поля вдоль пролетного канала.

Размеры сдвоенной гребенки, а также размеры ОР и размеры согласующей канавки подбираются таким образом, чтобы реализовался совместный резонанс, при котором амплитуда колебаний в полости ОР в несколько раз меньше, чем амплитуда поля в пролетном канале [16, 17].

2. Уравнения движения электронных частиц. Взаимодействие электронного пучка с полем в зазоре гребенки моделировалось на основе метода крупных частиц. Предполагается, что действующее на электроны пучка поле в зазоре гребенки не меняется вдоль оси y . Для учета двумерных эффектов расслоения пучка и оседания электронов на гребенку при расчетах будем использовать трехмерные релятивистские уравнения движения электронов, которые в принятых безразмерных переменных имеют вид

$$\begin{cases} \frac{dP_{xli}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zli}} (-E_{xli} - E_{xli}^q - \beta_{yli}F_z + \beta_{zli}B_y), \\ \frac{dP_{yli}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zli}} (-\beta_{zli}B_x + \beta_{yli}F_z), \\ \frac{dP_{zli}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zli}} (-E_z - E_{zli}^q - \beta_{xli}B_y + \beta_{yli}B_x); \\ \frac{dx_{li}}{dz} = \frac{\beta_{xli}}{\beta_{zli}}; \quad \frac{d\theta_{li}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zli}}; \quad \vec{P}_{li} = \gamma_{li}\vec{\beta}_{li}; \\ \gamma_{li} = 1/\sqrt{1 - \vec{\beta}_{li}^2} = \sqrt{1 + P_{xli}^2 + P_{yli}^2 + P_{zli}^2}. \end{cases} \quad (1)$$

Начальные условия для электронов-частиц

$$\begin{aligned} \theta_{li}(0) &= \frac{2\pi}{N_{es}}(i - 0,5); \quad \beta_{li}(0) = \beta_0; \\ x_{li}(0) &= \frac{b_0}{N_s}(l - 0,5); \quad i = 1 \dots N_s. \end{aligned}$$

Здесь $0 < z < L_v$ – длина гребенки; l – номер электронного слоя; $2N_s$ – количество слоев выбранных на толщине ленты электронного потока; i – номер частицы в слое; N_{es} – количество частиц, влетающих в область взаимодействия за период колебания; $\vec{\beta}_{li} = \vec{v}_{eli}/c$; $\theta_{li} = \omega_0 t_{li}$, t_{li} – относительная скорость и время пролета электронной частицей сечения z . По мере оседания электронов-частиц на гребенку (при $x_{li} > a$) они выводятся из взаимодействия и это учитывается в дальнейшем при расчете интегральных характеристик.

Безразмерные электрические компоненты ВЧ-поля вводились как $\vec{E} = e\vec{E}'/(m_0\omega_0 c)$, $\vec{E}^q = e\vec{E}'^q/(m_0\omega_0 c)$, \vec{E}' – поле резонатора, \vec{E}'^q – поле пространственного заряда. Магнитное фокусирующее поле $F_z = eB_z/(m_0\omega_0)$, B_z – индукция фокусирующего магнитного поля. Магнитные

компоненты ВЧ-полей в уравнениях движения не учитывались.

Безразмерное ВЧ-поле резонатора представлялось в виде $\{\vec{E}, \vec{B}\} = A\{\vec{E}^0, \vec{B}^0\}$, где \vec{E}^0, \vec{B}^0 – векторы рабочей собственной моды резонатора, нормированной таким образом, что в зазоре гребенки амплитуда компоненты E_z равна единице, A – безразмерная амплитуда.

Электронный КПД, представляющий отношение энергии электронов пучка в сечении z к начальной энергии в сечении $z = 0$, для каждого слоя и суммарный рассчитывались по формулам

$$\eta_l^e(z) = \frac{1}{N_{es}} \sum_{i=1}^{N_{es}} \frac{\gamma_0 - \gamma_{li}(z)}{\gamma_0 - 1}, \quad \eta^e(z) = \frac{1}{N_s} \sum_{l=1}^{N_s} \eta_l^e. \quad (2)$$

Волновой КПД – $\eta^v(z)$, представляющий отношение затраченной мощности на торможение (ускорение) электронов, пролетающих от начала до сечения z в поле резонатора \vec{E} к мощности электронов на входе резонатора, находим из решения совместно с уравнениями (1) дифференциального уравнения

$$\frac{\partial \eta^v(z)}{\partial z} = \frac{1}{(\gamma_0 - 1)N_e} \sum_{i=1}^{N_s} \frac{\vec{\beta}_i \vec{E}(x_i, z, \theta_i)}{\beta_{zi}}; \quad \eta^v(0) = 0. \quad (3)$$

Заметим, что в кинематическом приближении (без учета поля пространственного заряда) волновой и электронный КПД совпадают. При учете поля заряда часть энергии электронов аккумулируется в потенциальном поле пространственного заряда, образовавшегося в результате группировки электронного сгустка, и наблюдается незначительное различие в энергии, затраченной резонансным полем, и изменением энергии электронов. Этот эффект, описанный в работе [18], заметно проявляется в расчете модулятора усилителей при коэффициентах усиления, больших 15...20 дБ, когда мощность сигнала оказывается сравнимой с мощностью, связанной полем пространственного заряда. Поэтому при расчете мощности сигнала следует использовать волновой КПД.

Качество процесса группирования электронов для каждого слоя оценивается функцией группировки на гармонике $m\omega$:

$$\begin{aligned} G_{rl}^m(z) &= \\ &= \frac{1}{N_{es}} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N_{es}} \cos(m\theta_{li}(z)) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^{N_{es}} \sin(m\theta_{li}(z)) \right]^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Величина G_{rl} пропорциональна амплитуде гармоники тока в электронном пучке

3. Резонансное поле в канале для ленточного электронного потока сдвоенной гребенки. Предполагается, что рабочий тип собственного колебания ОР имеет единичный по z ин-

декс, т. е. распределение поля по z вблизи поверхности гребенки имеет вид $A_{0r} \sin(\pi z/L_z)$. При этом колебания во всех ячейках сдвоенной гребенки синфазны с колебанием поля ОР, а амплитуда поля в ячейке, расположенной вблизи сечения z , пропорциональна амплитуде $\sin(\pi z/L_z)$.

В зазоре $-a < x < a$, где происходит взаимодействие с электронным пучком, поле имеет распределение по x вида $\cosh(k_x x) / \cosh(k_x a)$, k_x – поперечное волновое число, которое определяется периодом гребенки [6]. Ввиду такой симметрии поля динамическое расслоение в достаточно тонком пучке проявляется слабо. Более того, при определенных размерах сдвоенной гребенки в ней возможен резонанс, при котором амплитуда поля A в зазоре гребенки может в 5–6 раз превосходить амплитуду поля A_{0r} в ОР.

Анализ показал, что в зазоре гребенки $[0 < z < L_v, 0 < x < a(z)]$ поле можно аппроксимировать с хорошей точностью следующими формулами [6]:

$$\begin{aligned} E_z &= \frac{A}{2} A_m(z) \left[\frac{\cosh(k_x x)}{\cosh(k_x a(z))} \sin(k_z z) + 1 \right] \sin(\theta + \varphi), \\ E_x &= \frac{A}{2} A_m(z) \frac{k_z}{k_x} \frac{\sinh(k_x x)}{\cosh(k_x a(z))} \cos(k_z z) \sin(\theta + \varphi), \\ A_m(z) &= \sin\left(\pi \frac{z + \Delta L}{L_z}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$k_z = 2\pi / d_v, \quad k_x = \sqrt{k_z^2 - W^2}.$$

Здесь $0 < z < L_v$, $L_v = n_v d_v$ – длина гребенки; L_z – длина зеркала резонатора; $L_z > \Delta L + L_v$; ΔL – расстояние начала гребенки от переднего края зеркала; $a(z) = a_0 - (a_0 - a_L)z / L_v$ – ширина зазора может изменяться. Распределение поля на гребенке определяется ее положением относительно центра зеркала и задается в (5) параметрами L_v , L_z и ΔL .

4. Уравнение возбуждения резонансной системы ОР – сдвоенная гребенка. При расчете возбуждения резонатора электронным потоком следует учитывать, что амплитуда поля A и заданная нагруженная добротность Q_H связаны соотношением, представляющим уравнение возбуждения, которое в принятых переменных запишем в виде

$$Q_H = \frac{\omega \Sigma_s}{\eta^v I_0 U_0} \cong 3,46 \cdot 10^8 \frac{A^2 \|\bar{E}^0\|^2}{\eta^v(A) I_0 U_0}. \quad (6)$$

Здесь Σ_s – запасенная в объеме резонатора энергия; $\|\bar{E}^0\|^2 = \int_V \dot{E}^{02} dV$ – безразмерная норма собственного рабочего колебания резонатора; $\eta^v(A)$

находится после решения уравнений движения (1) при заданной амплитуде из уравнения (3). Таким образом, при заданных Q_H , I_0 , U_0 амплитуду A находим в результате итерационной процедуры решения уравнения (6). Если решение существует, то получаем значение A и величину КПД. Если решение не существует (итерации не сходятся), то генератор не возбуждается при заданных значениях Q_H , I_0 , U_0 . Используя этот способ для заданных I_0 , U_0 , находили величину нагруженной добротности Q_g , при которой генерация начинается, и величину добротности Q_{\max} , при которой достигается генерация электромагнитных колебаний с максимальным КПД. При необходимости по этим величинам пересчитываются токи – пусковой $I_{0g} = I_0 Q_g / Q_H$ и рабочий $I_{\max} = I_0 Q_{\max} / Q_H$ для заданной добротности Q_H .

Получим приближенную оценку величины $\|\bar{E}^0\|^2$, входящей в уравнение (6) для системы ОР – сдвоенная гребенка. Полагаем, что в ОР поле как вдоль x , так и вдоль z на торцах приближается к нулю. Поэтому в объеме между зеркалами ОР поле можно приближенно представить как поле E_{1n1} колебания прямоугольного резонатора с размерами $2L_x \times h_R \times L_z$, $h_R \approx n_R \pi$ (n_R – вертикальный индекс моды ОР). Без учета компоненты E_x , которая проявляется вблизи дифракционных щелей, имеем

$$E_z \approx A_{0r} \cos(\pi x/L_x) \sin(n\pi y/h_R) \sin(\pi z/L_z),$$

A_{0r} – амплитуда поля в ОР.

Электрическая компонента в полости $2h_g \times (l_g + h_s) \times 0,5d_v$ гребенки, расположенной в сечении z_k для E_{110} -моды может быть представлена в виде

$$E_z \approx A_{g0} \sin(\pi z_k/L_z) \cos(\pi x/h_R) \sin(\pi y/l_g),$$

A_{g0} – максимальная амплитуда колебания в гребенке. Введя коэффициент $A_{0r} = k_g A_{g0}$ и принимая $A_{g0} = 1$ для собственного колебания \bar{E}^0 , получим следующую приближенную формулу для n_g гребенок:

$$\|\bar{E}^0\|^2 = \frac{1}{4} \left[k_g^2 l_x n_R \pi L_z + n_g h_g (l_g + h_s) \times \left(\frac{L_v}{2} - \frac{\sin(2\pi(\Delta L_1 + L_v)/L_z) - \sin(2\pi\Delta L_1/L_z)}{4\pi/L_z} \right) \right]. \quad (7)$$

5. Поиск оптимальных вариантов устройства генератора. Анализ предыдущих исследований [9], а также результаты, полученные в работах [8, 13, 14], указывают на то, что орбит-

трон при определенных условиях (обеспечение монотонного возрастания и необходимой величины амплитуды вдоль гребенки, задание оптимального профиля нерегулярности сдвоенной гребенки) обеспечивает генерацию с электронным КПД до 40–70 % в нижнем сантиметровом диапазоне. Однако при увеличении частоты, как и у всех приборов О-типа, его эффективность резко понижается. Для установления предельно возможных КПД в нижнем миллиметровом диапазоне с учетом резонанса в гребенке ниже выполнен оптимизационный поиск вариантов орбитрона на частоте $f = 180$ ГГц, которой соответствует длина волны $\lambda = 1,667$ мм.

Следующие параметры определялись имеющимся в наличии источником ленточного электронного потока (напомним, что штрихованные переменные являются размерными, в отличие от одноименных безразмерных):

- рабочее напряжение $U_0 = 3,503$ кВ;
- рабочий ток $I_0 = 0,05 \dots 0,2$ А;
- толщина ленты электронного потока $2b' = 0,1$ мм;
- ширина ленты электронного потока $b'_w = 1,7$ мм $\sim \lambda$;
- ширина гребенки $l'_g = 2,6$ мм $\sim 1,5\lambda$.

Параметры сдвоенной гребенки и размер зеркал подбирались из результатов расчета. Их ориентировочные значения, которые принимались как начальные были следующими.

Гребенка:

- период $d'_v \sim 0,19$ мм ($d_v = 0,73$) определяется из условия точного синхронизма ($\beta_p = \beta_0$);
- длина гребенки $L_v = d_v n_v$ определяется количеством периодов $n_v = 10 \dots 35$;
- зазор $2a' = 0,11$ мм ($a = 0,21$).

Длина зеркала $L_z = 30 \dots 50$ подбиралась исходя из длины гребенки и обеспечения оптимального профиля амплитуды ВЧ-поля вдоль области взаимодействия.

При расчете задавалось количество периодов n_v , оптимизировались по максимуму КПД период гребенки d_v и амплитуда A . Длина зеркала задавалась такой, чтобы конец гребенки совпадал с центром ОР $L_z \sim 2(L_v + \Delta L)$, что обеспечивает плавное нарастание амплитуды до максимальной. Магнитное поле B_0 подбиралось минимальным, при котором электроны не оседали на гребенку. Находились: значение нагруженной добротности, при которой достигается максимальный КПД (Q_{\max} , η_{\max}), и значение Q_g нагруженной добротности, при котором возникла генерация.

Анализ полученных вариантов показывает, что при уменьшении количества периодов гребенки с $n_v = 34$ до $n_v = 20$ КПД генерации монотонно возрастает с $\eta_{\max} = 0,09$ до $\eta_{\max} = 0,12$. При $n_v = 22$ значение добротностей Q_{\max} и Q_g имеет минимум: $Q_{\max} = 1558$, $Q_g = 697$. Оптимальное значение периода $d_v \cong 0,703$ немного ниже синхронного $0,73$, что соответствует некоторому превышению скорости электронов над фазовой скоростью $\beta_0 > \beta_p$.

На рис. 2, а кривая 1 представляет нормированный профиль $A_m(z)$ амплитуды поля вдоль гребенки. Как видно, амплитуда возрастает до конца области взаимодействия.

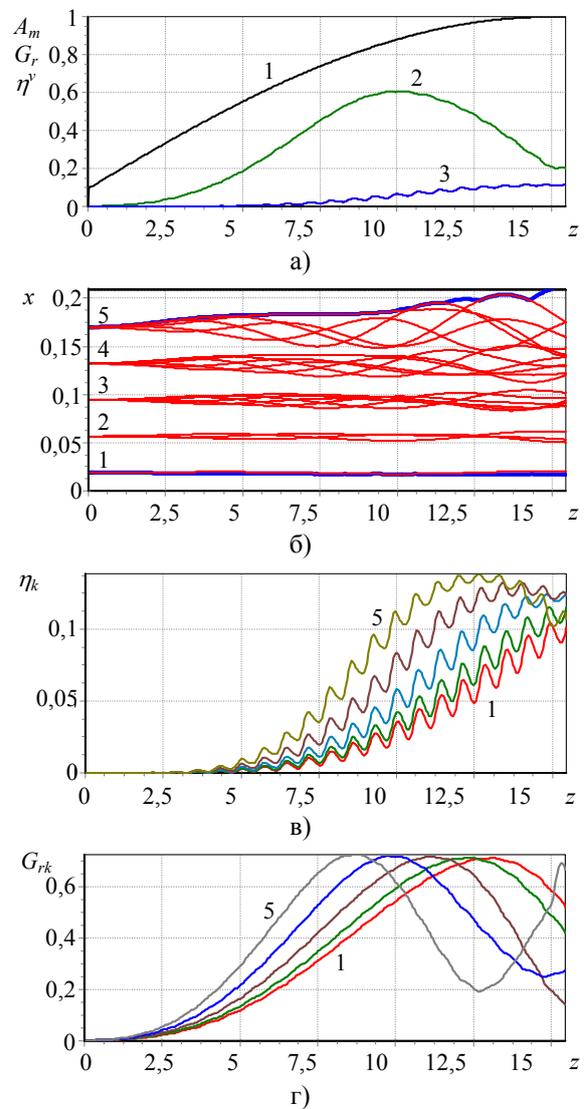


Рис. 2. Характеристики генератора: а) – интегральные характеристики (1 – A_m , 2 – G_r , 3 – η^v); б) – траектории электронов; в) – КПД в слоях; г) – функции группировки в слоях; $n_v = 22$, $d_v = 0,703$, $L_v = 15,45$, $L_z = 32$, $\Delta L = 1$, $B_0 = 0,77 T$, $A_{\max} = 0,0019$, $\eta_{\max} = 0,114$

На рис. 2, б представлены траектории электронов пяти слоев. В слоях 3–5 показаны траектории шести электронных частиц, в слое 2 – три траектории, в слое 1 – одна. Видно, что имеет место перемешивание слоев, прилегающих вплотную к гребенке, в основном из-за воздействия поперечной компоненты E_x . Ход отбора энергии по слоям иллюстрирует рис. 2, в. В слоях, прилегающих к гребенке, насыщение кривых $\eta_j(z)$ наступает раньше, чем во внутренних слоях. В результате максимально возможный для отдельного слоя КПД не достигается. Как видно из рис. 2, г, имеет место существенное различие в группировании электронов различных слоев: в электронных слоях, находящихся вблизи гребенки, максимум группировки наступает раньше.

Следует отметить, что при расчете генератора влияние поля пространственного заряда начинает сказываться (если сравнивать с расчетом по кинематическому приближению) начиная с тока 0,4А, что объясняется относительно малой плотностью тока в используемом достаточно широком ленточном пучке.

6. Влияние резонанса в гребенке и индекса моды ОР на величину нагруженной добротности. Как было обнаружено в эксперименте [17] и проверено численным моделированием [16], при резонансных размерах гребенки амплитуда ВЧ-поля в объеме между зеркалами ОР может быть в несколько раз меньше, чем зоне ленточного электронного потока в пролетном канале сдвоенной гребенки. Коэффициент k_g в формуле для оценки величины нормы собственного колебания (7), которая входит в расчет нагруженной добротности, учитывает эту особенность. В формуле (7) первое слагаемое характеризует запасенную энергию ОР, второе определяет долю энергии в n_g гребенках. Кроме того, величина требуемой добротности зависит от индекса n_R рабочего колебания ОР, и при его увеличении возрастает доля энергии, сосредоточенная в ОР. Влияние этих факторов на величину максимальной и пусковой добротности для вышеописанного оптимального варианта характеризуют зависимости, представленные ниже в виде табл. 1, 2.

Таблица 1

Влияние индекса моды ОР при $k_g = 0,2$

n_R	0	1	2	3	4
Q_{max}	891	1216	1558	1866	2190
Q_g	398	544	697	836	981
I_{gn}/I_{g1}	0,73	1,00	1,28	1,53	1,80

Как видно из табл. 1, с увеличением индекса величина требуемой нагруженной добротности возрастает за счет увеличения доли запасенной в ОР энергии. Нулевому значению индекса соответствует гипотетический генератор на гребенке без ОР. Заметим, что при фиксированной добротности, например при $Q_H = Q_{g1} = 544$ ($n_R = 1$), пусковой ток с увеличением n_R возрастает пропорционально росту Q_g : $I_{gn}/I_{g1} = Q_{gn}/Q_{g1}$.

Таблица 2

Влияние коэффициента k_g при $n_R = 2$

k_g	1	1/2	1/3	1/5	1/8
Q_{max}	17137	4953	2703	1558	1145
Q_g	7677	2219	1210	697	512
I_{gn}/I_{g1}	1	1/3,4	1/6,3	1/11,1	1/15,0

В табл. 2 значению $k_g = 1$ соответствует полное отсутствие резонанса в гребенке и амплитуда поля в пролетном канале равна амплитуде поля в ОР, что характерно для оротрона. Наличие резонанса в гребенке приводит к увеличению амплитуды поля в пролетном канале по отношению к амплитуде поля ОР в $1/k_g$ раз. При уменьшении k_g уменьшается необходимое значение нагруженной добротности, и соответственно, уменьшается значение пускового тока по сравнению с пусковым током генератора с нерезонансной гребенкой. Как следует из табл. 2, значение пускового тока может уменьшиться в 15 раз. В то время как в оротроне с ОПС при резонансе наблюдается уменьшение пускового тока только в два раза [9].

7. Исследование клиноорбитрона-генератора. Как показали вышеприведенные результаты расчетов, без ограничения на значение амплитуды поля в канале величина максимально достижимого КПД орбитрона-генератора не превосходит 10–12 %, что втрое меньше теоретически возможного 30–40 %. Анализ показывает, что в рассматриваемом диапазоне 180 ГГц основным ограничивающим фактором является эффект расслоения электронного пучка. Несмотря на то что в зазоре сдвоенной гребенки имеет место поперечное распределение поля по гиперболическому косинусу, в рассматриваемом диапазоне неоднородность поля значительная – коэффициент провисания поля q_g (отношение амплитуды в центре зазора к амплитуде на поверхности гребенки) равен 0,3.

В работе [19] была рассмотрена возможность применения клинотронного эффекта для компенсации эффекта расслоения в ленточном электронном потоке, который протекает в пространстве взаимодействия орбитрона в виде двоянной гребенки с рабочими поверхностями периодических структур, сходящихся клином. Такая модификация орбитрона получила название клиноорбитрон. Было, в частности, показано, что в клиноорбитроне диапазона $f = 100$ ГГц с коэффициентом провисания поля в зазоре $q_g \sim 0,7$ получен расчетный КПД 25 % при использовании электронного пучка толщиной до 0,4 мм.

Далее приведем результаты расчета клиноорбитрона в диапазоне 180 ГГц для пучка толщиной 0,1 мм при параметре заполнения канала пучком $q = b/a = 0,9$ и коэффициенте провисания поля $q_g \sim 0,3$.

На рис. 3 схематично представлено сечение канала пространства взаимодействия рассматриваемого клиноорбитрона и распределение интенсивности электромагнитного ВЧ-поля в ОР над двоянной гребенкой. Для выравнивания эффективности энергообмена по слоям ленточного электронного потока на участке длиной L_{vr} рабочие поверхности двух гребенок пространства

взаимодействия клиноорбитрона установлены зеркально симметрично в параллельных оси ОР плоскостях.

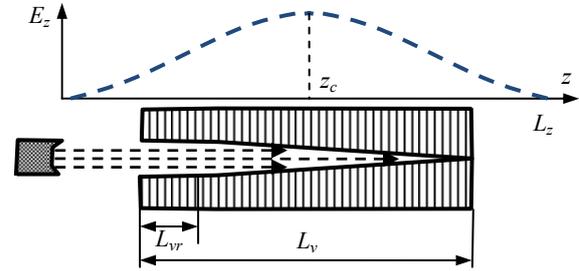


Рис. 3. E_z – распределение интенсивности ВЧ-поля в ОР над двоянной гребенкой и сечение (xz) пространства взаимодействия клиноорбитрона

При поиске оптимальных по КПД вариантов подбирались: длина двоянной гребенки L_v , длина L_{vr} канала с параллельными стенками, длина L_z верхнего подвижного зеркала, расположение его центра z_c относительно двоянной гребенки и амплитуда поля A .

На рис. 4 приведены характеристики одного из оптимизированных вариантов клиноорбитрона с шириной канала на длине L_{vr} такой же, как в орбитроне.

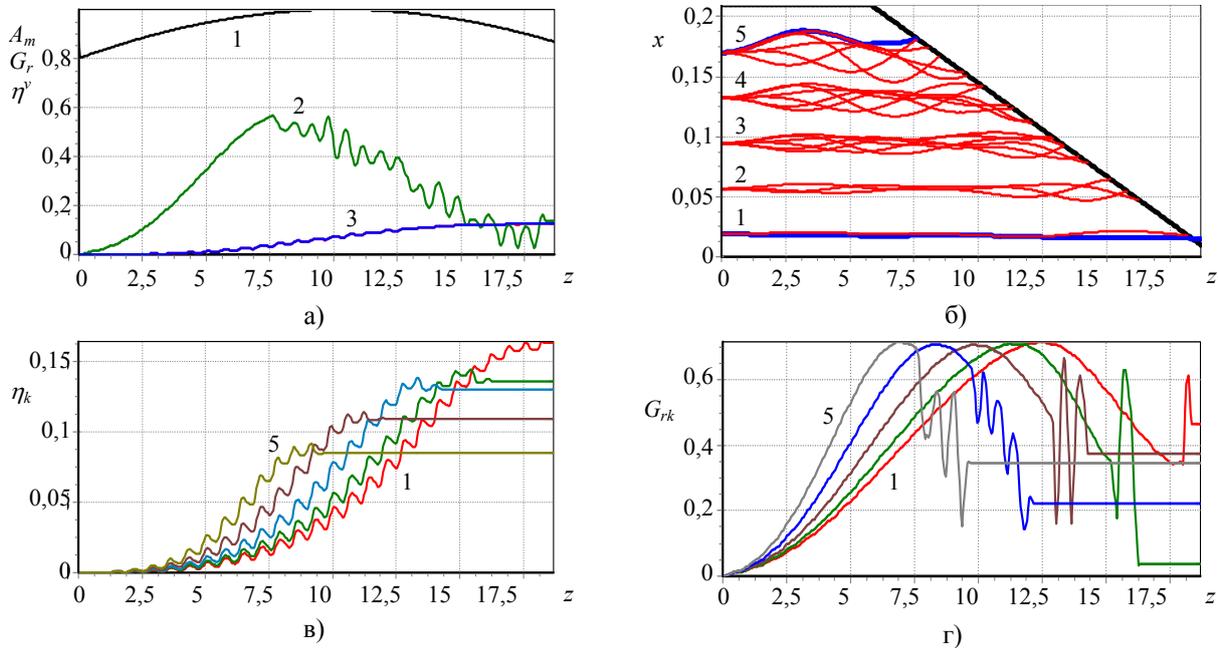


Рис. 4. Характеристики клиноорбитрона-генератора: а) – интегральные характеристики (1 – A_m , 2 – G_r , 3 – η^v); б) – траектории электронов; в) – КПД в слоях; г) – функции группировки в слоях; $n_v = 27$, $L_z = 50,5$, $\Delta L = 15$, $L_v = 18,7$, $L_{vr} = 5,8$, $a = 0,21$, $b = 0,189$, $A_{max} = 0,00116$, $\eta_{max} = 0,124$, $B_0(T) = 0,77$, $Q_{max} = 587,6$, $Q_g = 411$

В отличие от орбитрона, теперь необходимое для оптимального отбора энергии на-

растание амплитуды вдоль движения электронов обеспечивается за счет клинотронного эффекта.

Поэтому оптимальное распределение поля $A_m(z)$ вдоль гребенки близко к постоянному, как видно из рис. 4, а, и следовательно, ее нужно располагать в центре зеркала. Из рис. 4, в следует, что не удастся выровнять величину КПД всех слоев.

Наибольший КПД достигается в средних слоях пучка. Как видно, в представленном варианте выигрыш в КПД (для пучка толщиной 0,1 мм) по сравнению с орбитроном незначителен $\eta \sim 0,124$. Однако это значение КПД достигается при меньшем значении амплитуды поля A и при меньшей нагруженной добротности. Следовательно, при одинаковой добротности пусковой ток клиноорбитрона примерно в два раза меньше.

Если в предыдущем варианте увеличить начальную толщину канала до $a = 0,25$, то при той же толщине пучка расчетный максимальный КПД клиноорбитрона составляет 14 %, выходная мощность – 49 Вт.

Заметим, что использование простейшего рекуператора в орбитроне позволит получить технический КПД порядка 50 %, в то время как реализовать рекуперацию в клиноорбитроне затруднительно.

Выводы. Численными методами проведен анализ процессов электронно-волнового взаимодействия в генераторе дифракционного излучения – орбитроне и его модификации – клиноорбитроне на частоте 180 ГГц. Результаты математического эксперимента и зондовых измерений распределения ВЧ-поля в пространстве взаимодействия подтверждают существенное возрастание интенсивности ВЧ-поля в зоне протекания ленточного электронного потока.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что орбитрон и его модификация клиноорбитрон имеют перспективу как эффективные вакуумные источники электромагнитного излучения при освоении терагерцевого интервала частот.

Библиографический список

1. *Bruc H. Wallace.* Analysis of RF imaging applications at frequencies over 100 GHz / H. Bruc Wallace // Appl. Opt. – 2010. – 49, N 19. – P. E38–E47.
2. *Tonouchi M.* Cutting-edge terahertz technology / M. Tonouchi // Nat. Photon. – 2007. – 1, N 2. – P. 97–105.
3. *Zhang X. C.* Terahertz wave imaging: Horizons and hurdles / X. C. Zhang // Phys. Med. Biol. – 2002. – 47, N 21. – P. 3667–3677.
4. *Koch M.* Terahertz technology: Quo vadis? / M. Koch // Photonik Intern. – 2006. – P. 14–17.
5. *Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн* / под ред. А. Я. Усикова. – К.: Наук. думка, 1986. – 386 с.
6. *Тараненко З. И.* Замедляющие системы / З. И. Тараненко, Я. К. Трохименко. – К.: Техника, 1965. – 309 с.
7. *Клиноорбитрон* / Г. Я. Левин, А. И. Бородкин, А. Я. Кириченко и др.; под ред. А. Я. Усикова. – К.: Наук. думка, 1992. – 200 с.

8. *Оптимизация закона изменения фазовой скорости волны вдоль гребенки оротрона на основе атомарных функций* / В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев, А. К. Синицын, А. И. Шакирин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1999. – 4, № 5. – С. 33–37.
9. *Цейтлин М. Б.* Оротрон. Анализ эффективных режимов / М. Б. Цейтлин, Е. А. Мясин // Радиотехника и электрон. – 1993. – 38, № 6. – С. 961–981.
10. *Мясин Е. А.* Оротрон – мощный резонансный генератор О-типа сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн / Е. А. Мясин // Радиотехника. – 2004. – № 2. – С. 22–32.
11. *А. с. № 669963 (СССР).* Генератор дифракционного излучения / В. Д. Еремка, В. К. Корнеенков, Б. К. Скрынник, В. П. Шестопалов // Открытия, изобретения. – 1977. – № 4. – С. 115.
12. *А. с. № 830946 (СССР).* Генератор дифракционного излучения / В. Д. Еремка, А. В. Стадник, В. П. Шестопалов // Открытия, изобретения. – 1982. – № 5. – С. 109.
13. *Атомарные функции в задаче оптимизации по КПД двухпучкового оротрона с нерегулярной сдвоенной гребенкой* / В. Д. Еремка, В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев и др. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектрон. – 2000. – № 3. – С. 58–62.
14. *Двухкаскадный орбитрон-усилитель и умножитель частоты* / А. В. Гуревич, В. Д. Еремка, В. Ф. Кравченко и др. // Успехи современной радиоэлектрон. – 2007. – № 10. – С. 64–69.
15. *Мясин Е. А.* Влияние резонансов периодической структуры на КПД оротрона / Е. А. Мясин, С. Г. Чигарев // Радиотехника и электрон. – 1990. – 35, № 5. – С. 1104–1106.
16. *Yeryomka V. D.* On the effectiveness of an orbictron using the resonance groove in a mirror plane / V. D. Yeryomka, A. A. Kurayev, A. K. Sinitsyn // Proc. 21st Intern. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo' 2011). – Sevastopol, 2011. – Vol. 1. – P. 269–271.
17. *Demchenko M. Yu.* The electrodynamic system of DRO-orbictron with doubled comb / M. Yu. Demchenko, V. D. Yeryomka, V. S. Miroshnichenko // Proc. 21st Intern. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo' 2011). – Sevastopol, 2011. – Vol. 1. – P. 272–274.
18. *Кураев А. А.* КПД релятивистских приборов О-типа с учетом энергии взаимодействия электронов / А. А. Кураев, Н. А. Кураев, А. К. Синицын // Радиотехника и электрон. – 1991. – 36, № 11. – С. 2179–2185
19. *Thick-electron beam klinoorbictron* / A. V. Gurevich, V. D. Yeryomka, A. A. Kurayev, A. K. Sinitsyn // Proc. 19th Intern. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo' 2009). – Sevastopol, 2009. – Vol. 1. – P. 173–175.

Рукопись поступила 29.07.2013 г.

V. D. Yeryomka, A. A. Kurayev, A. K. Sinitsyn

ORBICTRON-OSCILLATOR: DESCRIPTION OF A MODEL AND COMPUTATIONAL RESULTS OBTAINED IN THE 180 GHz RANGE

At present submm wave sources are in great demand when many engineering issues have to be tackled. Specifically these are: luggage scanning, photography of tumors, radars and coupling between large-size high-speed computers. These sources are bound to generate an output power of 1 to 50 W when using environmentally safe low-voltage electron flows. Among the electromagnetic radiation mm-wave sources the modification of an orotron is an obvious candidate for generating submm-waves. In this oscillator modification the binary comb is used instead of a plane periodical reflecting structure to ensure the wave slowing-down. This type of modification was referred to as an orbictron

(open resonator, binary comb, electron). The critical factors that result in diminishing its efficiency, as the operating frequency increases, are sheet electron flow layering (lamination) effect and clipping of the HF-field amplitude in a rectangular channel in which there occurs interaction of electrons and electromagnetic waves. These factors are due to the usage of the open resonator with marginally high load Q . A resonance effect in the binary comb of the orbictron has been detected. It showed that the HF-field amplitude in the electron-wave interaction space surpassed the field amplitude many times over across the space between the operating surfaces of open resonator mirrors. This effect is apt to change radically the estimation of the required Q value of the orbictrons resonance system and eliminates the amplitude clipping problem. Using the channel for the sheet electron flow in the interaction space as the form of the binary comb's operating tapered-shaped surfaces (klynoorbictron) yields sheet electron flow lamination (layering). The mathematical model that we have devised was applied to carry out an optimization search for promising variants of the orbictron-oscillator design in the 180 GHz range, with a 3.5 kV operating voltage of the electron flow and 0.1 F operating current. We have found the oscillator variants with 10 to 12 % efficiency at quality factors of that do not exceed 1 000. It is shown that the efficiency tends to increase up to 14 % owing to the use in the orbictron-oscillator of klynotron effect (klynoorbictron), whereas the resonator Q -factor shows a three-fold decrease. The obtained results indicate that the orbictron and its modified designs of klynoorbictron hold a great promise as THz-range electromagnetic radiation sources.

Key words: orotron, orbictron, oscillator, terahertz range, mathematical simulation.

В. Д. Єрьомка, О. О. Кураєв, А. К. Сініцин

ОРБИКТРОН-ГЕНЕРАТОР:
МОДЕЛЬ І РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ
В ДІАПАЗОНІ 180 ГГц

Джерела субміліметрового діапазону потрібні при розв'язанні багатьох технічних задач: при скануванні багажу, фотографуванні пухлин, у радіолокації, у системах зв'язку

між великими швидкодійними ЕОМ. Вони повинні забезпечувати генерування вихідної потужності 1...50 Вт при використанні екологічно безпечних низьковольтних електронних потоків. Серед джерел електромагнітного випромінювання міліметрового діапазону перспективним для генерування субміліметрових хвиль є модифікація оротрона, у якому для уповільнення хвиль замість плоскої відбивальної дифракційної структури використовується здвосна плоска гребінка. Таку модифікацію генератора назвали орбіктроном. Важливими факторами, що приводять до зниження його ефективності при підвищенні робочої частоти, є ефект розшарування стрічкового електронного потоку, обмеження амплітуди високочастотного поля в прямокутному каналі взаємодії електронів та електромагнітних хвиль внаслідок необхідності використання відкритого резонатора із гранично великою навантаженою добротністю. Виявлено ефект резонансу в здвосній гребінці орбіктрона, при якому амплітуда поля в зоні взаємодії електронів і хвиль у прямокутному каналі в декілька разів перевершує амплітуду поля в об'ємі між робочими поверхнями дзеркал відкритого резонатора. Цей ефект принципово змінює оцінку необхідної величини добротності резонансної системи орбіктрона та дозволяє вирішити проблему обмеження амплітуди. Використання простору взаємодії у вигляді каналу для стрічкового електронного потоку, створеного робочими поверхнями здвосної гребінки, які сходяться клином, дозволяє вирішити проблему розшарування стрічкових електронних потоків. З використанням розробленої математичної моделі проведено оптимізаційний пошук перспективних варіантів конструкції орбіктрона-генератора в діапазоні 180 ГГц із напругою електронного потоку 3,5 кВ і робочим струмом 0,1 А. Знайдено варіанти генератора з ККД 10...12 % при добротностях, які не перевищують 1 000. Показано, що використання клинотронного ефекту в орбіктроні-генераторі (клиноорбікtron) його ККД підвищується до 14 %, а добротність резонатора зменшується в три рази. Отримані результати вказують на перспективність орбіктрона та його модифікації клиноорбіктрона як джерел електромагнітного випромінювання терагерцового інтервалу частот.

Ключові слова: оротрон, орбікtron, генератор, терагерцовий діапазон, математичне моделювання.