

УДК 621.385.6

А. В. АКСЕНЧИК, А. А. КУРАЕВ, И. Ф. КИРИНОВИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХ-, ТРЕХСЕКЦИОННЫХ ЛБВ О-ТИПА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь,
e-mail: aksenchik@bsuir.by*

Проведен анализ физических процессов в ЛБВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах с последовательным и параллельным расположением секций относительно электронных лучей. Отмечены особенности и преимущества различных конструкций усилителей. Показано, что расчетный коэффициент усиления двух- и трехсекционных ЛБВ может достигать 25–60 дБ в диапазоне частот 0,14–3 ТГц.

Ключевые слова: терагерцовый, лампа бегущей волны, ЛБВ, волнообразно изогнутый прямоугольный волновод, двухсекционный, усилитель

A. V. AKSENCHYK, A. A. KURAYEV, I. F. KIRINOVICH

MODELLING OF TWO-, THREESECTIONS TWT OF O-TYPE OF TERAGERTS BAND FREQUENCIES

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus,
e-mail: aksenchik@bsuir.by*

A analysis of physical processes in TWT on folded waveguide with a consecutive and parallel arrangement of sections concerning electronic beams is carried out. Features and advantages of different construction of amplifiers are noted. It is shown, that the calculated gain of two-and threesections TWT can reach 25–60 dB in the band of frequencies 0,14–3 THz.

Keywords: teragerts, traveling wave tube, TWT, folded waveguide, two-section, amplifier

Введение. Перспективными приборами для работы в терагерцовом диапазоне частот являются ЛБВ и ЛОВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах [1–7].

В [1, 2] рассчитаны частотные характеристики для ЛБВ субмиллиметрового диапазона и проведен подробный анализ влияния различных параметров ЛБВ на вид частотных характеристик. В этом диапазоне длин волн расчеты частотных характеристик ЛБВ будут иметь свои особенности, вызванные следующими причинами: 1) для получения приемлемого усиления необходимо применение многозвенных (одно звено – изогнутый отрезок волновода) приборов (число звеньев больше 20). Это вызвано тем, что углы пролета электронов в зазорах взаимодействия составляют несколько радиан; 2) для уменьшения углов пролета электронов в зазорах необходимо повышенное ускоряющее напряжение; 3) на усиление прибора значительное влияние оказывает проводимость стенок волновода. В указанных работах отмечается, что даже односекционные ЛБВ с коэффициентом усиления по мощности 10–20 дБ могут самовозбуждаться на определенных частотах. Для подавления самовозбуждения таких ЛБВ используются методы, предложенные в [2].

Для усиления сигналов терагерцового диапазона применяются многосекционные ЛБВ с последовательным [2, 3] и параллельным [4, 5] расположением секций относительно электронных лучей. Рассмотрим особенности и преимущества той или иной конструкции усилителей.

На рис. 1. приведена схема двухсекционной ЛБВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах с последовательным расположением секций относительно электронного луча. Каждая секция состоит из шести звеньев (одно звено – изогнутый отрезок волновода). Разделение

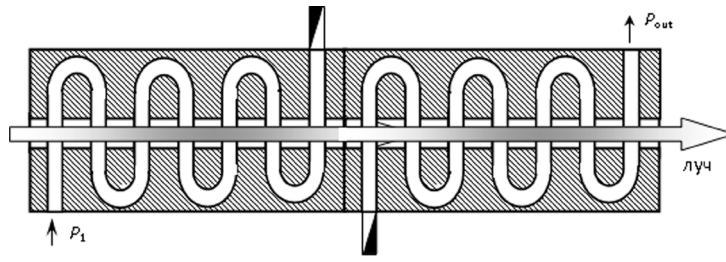


Рис. 1 Двухсекционная ЛБВ с последовательным расположением секций относительно электронного луча

ЛБВ на две или три секции, не связанные по электромагнитной (ЭМ) волне, уменьшает возможность прибора к самовозбуждению и позволяет значительно увеличить коэффициент усиления.

Как видно из рис. 1, секции по ЭМ-волне не связаны, а связаны по электронному потоку. Концы волноводов этих секций нагружены на поглощающие, согласованные нагрузки. В первой секции электронный поток получает предварительную модуляцию по скорости и плотности. На вход второй секции поступает модулированный поток электронов, возбуждающий в ней ЭМ-волну, которая получает дальнейшее усиление, и одновременно увеличивается модуляция электронного потока по скорости и по плотности. В результате во второй секции модулированный электронный поток возбуждает ЭМ-волну с нарастающей амплитудой и с выходного конца второй секции усиленная ЭМ-волна мощностью P_{out} поступает в нагрузку (антенну, волновод и т. д.).

На рис. 2, а приведена схема трехсекционной ЛБВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах с параллельным расположением секций относительно электронных лучей (пучков). В данной конструкции сигнал с выхода первой секции поступает на вход второй секции и т. д., с выходного конца третьей секции усиленная ЭМ-волна мощностью P_2 поступает в нагрузку (антенну, волновод и т. д.). Преимущество этой конструкции состоит в том, что если возникают трудности в транспортировке электронного луча на значительное расстояние (из-за большой длины пространства взаимодействия, например, из-за большого числа звеньев или в конструкции с последовательным расположением секций), то конструкция с параллельным расположением секций предпочтительнее.

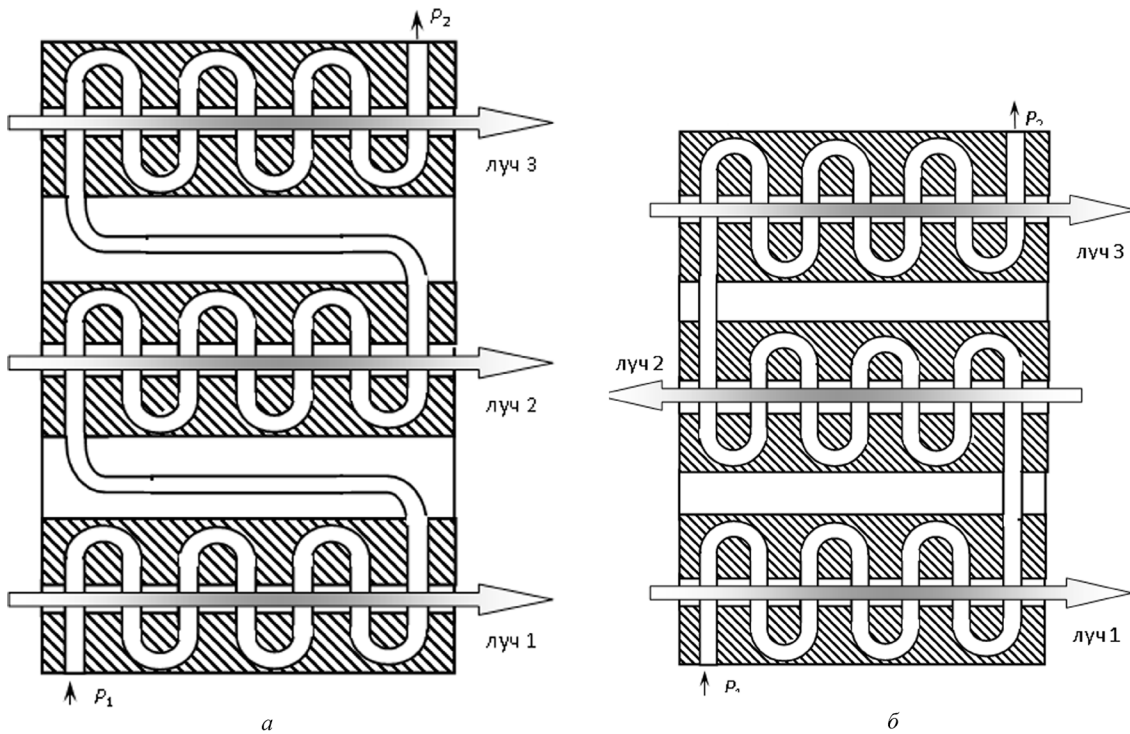


Рис. 2. Трехсекционная ЛБВ с параллельным расположением секций относительно электронных лучей: а – попутные пучки электронов, б – встречные пучки электронов

Одним недостатком данной конструкции является то, что самовозбужденный сигнал в первой или во второй секции усиливается в последующих секциях и появляется на выходе прибора в нагрузке. Другой недостаток – наличие отрезков волновода, соединяющих выход первой секции со входом второй, выход второй секции со входом третьей. В субмиллиметровом, терагерцовом диапазонах потери в стенках волноводов значительно уменьшают сигнал (на несколько децибелл), что ведет к уменьшению коэффициента усиления прибора.

В отличие от традиционной конструкции [4] на рис. 2, б изображена схема ЛБВ на встречных пучках, в которой отсутствуют встречные волноводные тракты связи секций, что существенно снижает потери сигнала в субмиллиметровом диапазоне. Однако здесь конструкция катодно-коллекторного блока более сложная.

Для расчетов процессов взаимодействия в этих конструкциях усилителей используется одна и та же математическая модель, в которой особенности конструкций учитываются заданием начальных условий при интегрировании уравнений движения электронов.

Математическая модель нерегулярной ЛБВ на волнообразно изогнутом волноводе. Одна секция описанных приборов (рис. 1, 2) моделируется цепочкой эквивалентных четырехполюсников, где один четырехполюсник моделирует один изогнутый отрезок волновода – одно звено.

В [1, 3] сформулирована самосогласованная нелинейная математическая модель ЛБВ и ЛОВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах: описаны уравнения возбуждения волновода, уравнения возбуждения цепочки эквивалентных четырехполюсников, уравнения движения электронов. Отметим, что адекватность математической модели физическим процессам в ЛБВ зависит от многих факторов, в том числе от точности решения дифференциальных уравнений движения электронов. Анализ сравнения результатов расчетов параметров ЛБВ с экспериментальными данными свидетельствует о том, что точность расчета параметров и режима работы ЛБВ определяет точный расчет сил пространственного заряда в электронном пучке и расчет полей для реальной конфигурации зазора. Данная модель используется для расчетов процессов взаимодействия электронных потоков с ЭМ-полями в описанных выше конструкциях усилителей.

При численном моделировании процессов взаимодействия электронных потоков с ЭМ-полями для проверки правильности решения задачи необходимо контролировать равенство электронного и волнового КПД в конце области взаимодействия, после последнего зазора.

Электронный КПД характеризует, какая часть начальной энергии электронов преобразовалась в энергию ЭМ-волны при торможении электронов в зазорах. Волновой КПД – это отношение мощности возбужденной ЭМ-волны к мощности источника ускоряющего напряжения. В односекционной ЛБВ, если нет потерь ЭМ-волны в стенках волновода и нет перегруппировки электронов, значения электронного и волнового КПД должны совпадать. Если будут учтены потери в стенках волновода, то значения волнового КПД будут меньше электронного КПД.

Учитывая, что по данной модели будут рассчитываться частотные характеристики, т. е. зависимости электронного, волнового КПД и коэффициента усиления по мощности K_p от относительной частоты, приводим формулы для расчета электронного и волнового КПД.

Электронный КПД рассчитывается через суммарную потерю мощности электронов пучка:

$$\eta_e = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \frac{\gamma_0 - \gamma_i}{\gamma_0 - 1}.$$

Волновой КПД рассчитывается через приращение мощности ЭМ-волны в k -м зазоре:

$$\eta_{wk} = \frac{\gamma_0 + 1}{\gamma_0} \frac{\vartheta_0}{N_e} \int_{T_{0k}}^{T_{1k}} \varepsilon^0 (T - T_{0k}) \exp(j(u_i - \vartheta_0 T + \vartheta_k)) dT,$$

где $T = y/L$, $\vartheta = \omega t$, $\gamma_0 = \left(1 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2\right)^{-1/2}$, $T_{0k} = y_1/L$, $T_{1k} = y_2/L$, $V_i = \frac{v_i}{v_0}$, $u_i = \omega t_i - \omega y/v_0$,

$\vartheta_0 = \frac{L\omega}{v_0}$, $\gamma_i = \left(1 - \left(\frac{v_i}{c}\right)^2\right)^{-1/2}$, $\vartheta_k = \Gamma \ell_k$, y – продольная координата движения электрона, v_i – ско-

рость электрона в сечении y , v_0 – начальная скорость электрона, c – скорость света в вакууме, Γ – постоянная распространения волны, L – длина ЛБВ, ℓ_k – длина отрезка волновода, $d = y_2 - y_1$ – длина зазора, ω – опорная частота, $\varepsilon^0(T - T_{0k})$ – весовая функция пространственного распределения поля зазора (рассчитывалась методом сеток).

По описанной в [1, 3] математической модели составлена программа для анализа режимов и оптимизации параметров ЛБВ и ЛОВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах и проведены расчеты вариантов ЛБВ.

Варианты ЛБВ для работы на частоте 140 ГГц. Для работы на частоте $f_0 = 140,024$ ГГц (длина волны $\lambda_0 = 2,1410$ мм) рассчитан вариант двухсекционной ЛБВ с последовательным расположением секций (рис. 1) (вариант А1): ускоряющее напряжение $U_0 = 11,7$ кВ, ток электронного луча $I_0 = 0,12$ А. Размеры волновода: $a = 1,2$ мм, $b = 0,12$ мм, эквивалентное сопротивление волновода $Z_w = 166,8$ Ом, радиус трубки дрейфа $R = 0,095$ мм, радиус электронного луча $r = 0,066$ мм, длина зазора $d = b$. Волновод изготовлен из меди с проводимостью $g = 57 \cdot 10^6$ См/м. В результате оптимизации параметров ЛБВ получен коэффициент усиления по мощности $K_p = 34,5$ дБ, электронный КПД $\eta_e = 0,056$, волновой КПД $\eta_w = 0,042$, выходная мощность ЛБВ $P_{out} = 59$ Вт, входная мощность $P_{in} = 0,021$ Вт. Коэффициент фазы эквивалентного четырехполосника $1,5$ рад. Коэффициент фазы четырехполосника K_φ определяет длину изогнутого отрезка волновода, соответствующего одному звену волнообразно изогнутого прямоугольного волновода (рис. 1):

$$K_{\varphi i} = \frac{2\pi s_i}{\lambda_w},$$

где s_i – длина i -го изогнутого отрезка волновода (звена) по средней линии; λ_w – длина волны в волноводе.

Число зазоров взаимодействия $N = 61$ (число звеньев – изогнутых отрезков волновода – равно $N-1$) в каждой секции. Обозначим двухсекционную ЛБВ с последовательным расположением секций как $N = 61 + 61$, где числа обозначают число зазоров в каждой секции.

Частотные характеристики данного варианта (зависимости электронного, волнового КПД и коэффициента усиления по мощности K_p от относительной частоты $w = f/f_0$) приведены на рис. 3, а, полоса частот усиления по уровню 3 дБ примерно равна 8%.

На рис. 3, а видна разность между электронным и волновым КПД. Дополнительная проверка режима работы ЛБВ показала, что эта разность обусловлена потерями в стенках волновода. Расчет режима данного варианта при повышенной проводимости стенок ($g = 57000 \cdot 10^6$ См/м) показывает, что значения электронного и волнового КПД практически совпадают. При этом на относительной частоте $w = 1$ получены $K_p = 36,4$ дБ, $\eta_e = 0,0695$, $\eta_w = 0,0662$, $P_{out} = 92,9$ Вт.

Небольшая разность между электронным и волновым КПД все же присутствует, но она обусловлена тем, что на выходе первой секции ($\eta_w = 0,00292$) мощность ЭМ-волны рассеивается в поглощающей нагрузке. Отсюда видно практически полное совпадение значений электронного и волнового КПД: $0,0695 \approx 0,0662 + 0,00292$.

Рассчитан вариант двухсекционной ЛБВ с параллельным расположением секций (рис. 2, б) (вариант А2, $N = 61 + 61$): $U_0 = 11,7$ кВ, $I_0 = 0,12$ А. Размеры трубок дрейфа, луча, волновода, число зазоров в секциях, как у варианта А1.

В результате оптимизации параметров ЛБВ получены $K_p = 35,5$ дБ, $\eta_e = 0,065$, $\eta_w = 0,054$, $P_{out} = 75$ Вт, $P_{in} = 0,021$ Вт. Частотные характеристики данного варианта – зависимости электронного, волнового КПД и коэффициента усиления по мощности K_p от относительной частоты w приведены на рис. 3, б, полоса частот усиления составляет примерно 8%.

На рис. 3, б можно отметить различие между величинами η_e и η_w . Проверка режима работы ЛБВ показала, что это различие обусловлено потерями в стенках волновода. Расчет режима данного варианта при повышенной проводимости стенок ($g = 57000 \cdot 10^6$ См/м) показывает, что значения электронного и волнового КПД практически совпадают. При этом получены на относительной частоте $w = 1$ $K_p = 37,7$ дБ, $\eta_e = 0,0857$, $\eta_w = 0,0849$, $P_{out} = 123,8$ Вт.

Для параметров луча, размеров трубок дрейфа, волновода, как у вариантов А1, А2, рассчитана трехсекционная ЛБВ (вариант А3, $N = 47 + 47 + 47$) с *параллельным* расположением секций

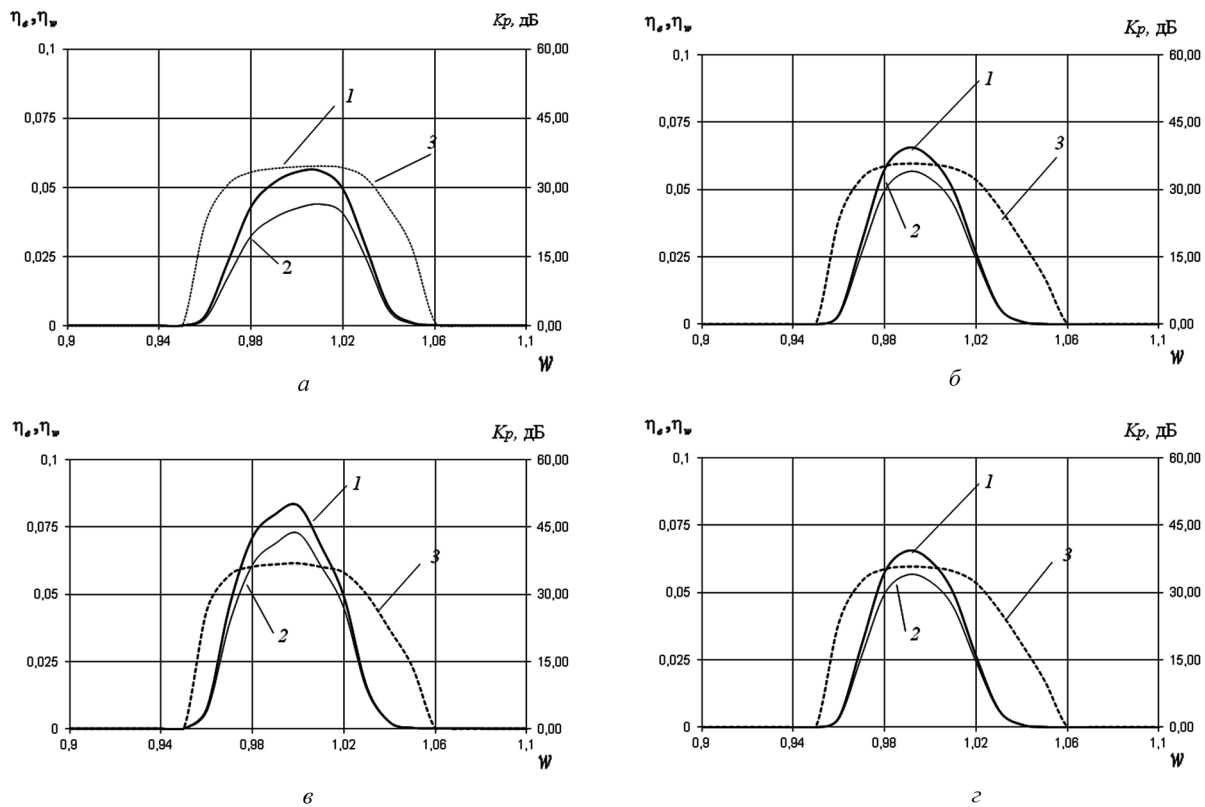


Рис. 3. Зависимости электронного, волнового КПД и коэффициента усиления по мощности K_p от относительной частоты $w = f/f_0$: кривая 1 – электронный КПД, кривая 2 – волновой КПД, кривая 3 – коэффициент усиления по мощности K_p ; а – последовательное расположение секций (вариант А1), б – параллельное расположение секций (вариант А2), в – вариант А3, $N=47+47+47$, $K_{пер} = 1$, г – вариант А4, $N=47+47+47$, $K_{пер} \approx 0,68$

(рис. 2, б, схема ЛБВ на встречных пучках), $g = 57 \cdot 10^6$ См/м. Коэффициент фазы эквивалентного четырехполосника равен 1,5 рад. Получены $K_p = 36,8$ дБ, $\eta_e = 0,083$, $\eta_w = 0,073$, $P_{out} = 102$ Вт, $P_{in} = 0,021$ Вт.

На рис. 3, в приведены зависимости электронного, волнового КПД и коэффициента усиления по мощности K_p от относительной частоты w варианта А3 с параллельным расположением секций (рис. 2, б), полоса частот усиления составляет 6–8%. Разность между электронным и волновым КПД обусловлена потерями в стенках волновода. Расчет режима этого варианта при повышенной проводимости стенок ($g = 57000 \cdot 10^6$ См/м) показывает, что значения электронного и волнового КПД практически совпадают. При этом на относительной частоте $w = 1$ $K_p = 38,9$ дБ, $\eta_e = 0,0957$, $\eta_w = 0,0945$, $P_{out} = 163$ Вт.

Для параметров луча, размеров трубок дрейфа, волновода, как у варианта А3, рассчитана трехсекционная ЛБВ с параллельным расположением секций (рис. 2, а, попутные электронные пучки), вариант А4, $N = 47 + 47 + 47$, $g = 57 \cdot 10^6$ См/м. Однако при расчете этого варианта учтено затухание ЭМ-волны за счет потерь в стенках отрезков волноводов, соединяющих выход первой секции с входом второй и т. д. (рис. 2, а). Уменьшение мощности ЭМ-волны при прохождении отрезка волновода будем характеризовать коэффициентом передачи $K_{пер} = P_2/P_1$, где P_1 и P_2 – соответственно мощности ЭМ-волны на входе и на выходе отрезка волновода. Коэффициент передачи определяется длиной отрезка волновода, для варианта А4 $K_{пер} \approx 0,68$. (Для конструкции ЛБВ, приведенной на рис. 2, б, принимаем $K_{пер} = 1$.) Получены $K_p = 35,5$ дБ, $\eta_e = 0,062$, $\eta_w = 0,054$, $P_{out} = 76$ Вт, $P_{in} = 0,021$ Вт. Коэффициент фазы эквивалентного четырехполосника равен 1,5 рад.

На рис. 3, г приведены зависимости электронного, волнового КПД и K_p от относительной частоты w варианта А4, $N = 47 + 47 + 47$, с параллельным расположением секций, $K_{пер} \approx 0,68$, полоса частот усиления равна примерно 6–7%. Если сравнить выходные данные вариантов А3 и А4 и их

частотные характеристики на рис. 3, в, з, то видно, что за счет потерь в отрезках волноводов уменьшились значения электронного и волнового КПД примерно на 2%, выходной мощности на 26 Вт, коэффициента усиления на 1,3 дБ. Это обусловлено уменьшением входных сигналов на входах второй и третьей секций (рис. 2, а), что ухудшило модуляцию электронного потока по скорости и по плотности.

Проведена проверка возможности компенсации потерь сигнала увеличением его мощности на входе первой секции. Рассчитан вариант А5, но при входной мощности, увеличенной примерно в три раза, $P_{in} = 0,059$ Вт. Получены $K_p = 32,4$ дБ, $\eta_e = 0,085$, $\eta_w = 0,0745$, $P_{out} = 104$ Вт. Как видно, выходная мощность получена, как у варианта А3, однако значение коэффициента усиления по мощности уменьшилось на 4,4 дБ. Частотные характеристики имеют такой же вид, как на рис. 3, в, за исключением зависимости K_p от относительной частоты, так как уровень значений K_p ниже на 4,4 дБ.

Расчеты показали, что при увеличении коэффициента фазы четырехполюсника от 1,5 до 2 рад, полоса частот усиления уменьшилась в 1,5–2 раза.

Варианты ЛБВ для работы на частоте 220 ГГц. Для работы на частоте $f_0 = 219,84$ ГГц (длина волны $\lambda_0 = 1,36340$ мм) рассчитан вариант регулярной односекционной ЛБВ, число зазоров $N = 81$ (изогнутых отрезков волновода $N-1$) (вариант С1, $N = 81$). Ускоряющее напряжение $U_0 = 11,7$ кВ, $I_0 = 0,12$ А. Размеры волновода: $a = 0,77$ мм, $b = 0,1$ мм, эквивалентное сопротивление волновода $Z_w = 210$ Ом, радиус трубки дрейфа $R = 0,095$ мм, радиус электронного луча $r = 0,066$ мм, длина зазора $d = b$. Волновод изготовлен из меди с проводимостью $g = 57 \cdot 10^6$ См/м. В результате оптимизации параметров ЛБВ получены $K_p = 10 \lg(P_{out} / P_{in}) = 22,8$ дБ, $\eta_e = 0,0566$, $\eta_w = 0,0473$, $P_{out} = 66,4$ Вт, $P_{in} = 0,35$ Вт.

Для увеличения выходной мощности и коэффициента усиления рассчитан вариант двухсекционной ЛБВ с последовательным расположением секций (рис. 1) (вариант С2, $N = 60 + 60$): $U_0 = 20$ кВ, $I_0 = 0,1$ А, $f_0 = 220,11$ ГГц (длина волны $\lambda_0 = 1,3620$ мм).

Размеры волновода: $a = 0,80$ мм, $b = 0,12$ мм, $Z_w = 210$ Ом, $R = 0,09$ мм, $r = 0,07$ мм, длина зазора $d = b$. Волновод изготовлен из меди с проводимостью $g = 57 \cdot 10^6$ См/м. В результате оптимизации параметров ЛБВ получены $K_p = 31,6$ дБ, $\eta_e = 0,0718$, $\eta_w = 0,0579$, $P_{out} = 115$ Вт, $P_{in} = 0,08$ Вт.

Частотные характеристики варианта С2 (с последовательным расположением секций, рис. 1) – зависимости электронного, волнового КПД и коэффициента усиления по мощности K_p от относительной частоты w – приведены на рис. 4, а, полоса частот усиления равна 6–7%.

Разность между значениями электронного и волнового КПД объясняется потерями в стенках волновода и часть мощности ЭМ-волны (примерно 5 Вт) рассеивается в поглощающей нагрузке на выходе первой секции. Дополнительный расчет этого варианта при $g = 57000 \cdot 10^6$ См/м дал следующие результаты: $K_p = 32,36$ дБ, $\eta_e = 0,0735$, $\eta_w = 0,0690$, $P_{out} = 138$ Вт, $P_{in} = 0,08$ Вт. Вторая секция работает в режиме перегруппировки. Волновой КПД на выходе первой секции 0,00413, выходная мощность на выходе первой секции 8 Вт. Как видим, $\eta_e = 0,0735$, что примерно равно сумме волновых КПД первой и второй секций: $0,0690 + 0,00413 = 0,0732$

Рассчитана двухсекционная ЛБВ с параллельным расположением секций (двухлучевая ЛБВ, рис. 2, б) (вариант С3, $N = 60 + 60$).

Ускоряющее напряжение $U_0 = 20$ кВ, $I_0 = 0,1$ А. Коэффициент фазы $K_\phi = 2$ рад. Размеры волновода: $a = 0,8$ мм, $b = 0,12$ мм, $Z_w = 348$ Ом, $R = 0,09$ мм, $r = 0,07$ мм, $d = b$. Волновод изготовлен из меди с проводимостью $g = 57 \cdot 10^6$ См/м. В результате оптимизации параметров ЛБВ получены $K_p = 31,2$ дБ, $\eta_e = 0,07$, $P_{out} = 106,7$ Вт, $P_{in} = 0,08$ Вт.

Частотные характеристики варианта С3 (с параллельным расположением секций, рис. 2, б) приведены на рис. 4, б, полоса частот усиления равна 6–7%. Можно отметить, что частотные характеристики этого варианта несимметричны относительно $w = 1$. Для сдвига частотных характеристик вправо, согласно проведенным ранее исследованиям [1, 2], необходимо уменьшить ускоряющее напряжение до $U_0 = 19,6$ кВ и частотные характеристики становятся симметричными относительно $w = 1$.

Рассчитана трехсекционная ЛБВ с параллельным расположением секций (трехлучевая ЛБВ на встречных пучках, рис. 2, б), вариант С4, $N = 45 + 45 + 45$. Ускоряющее напряжение $U_0 = 20$ кВ,

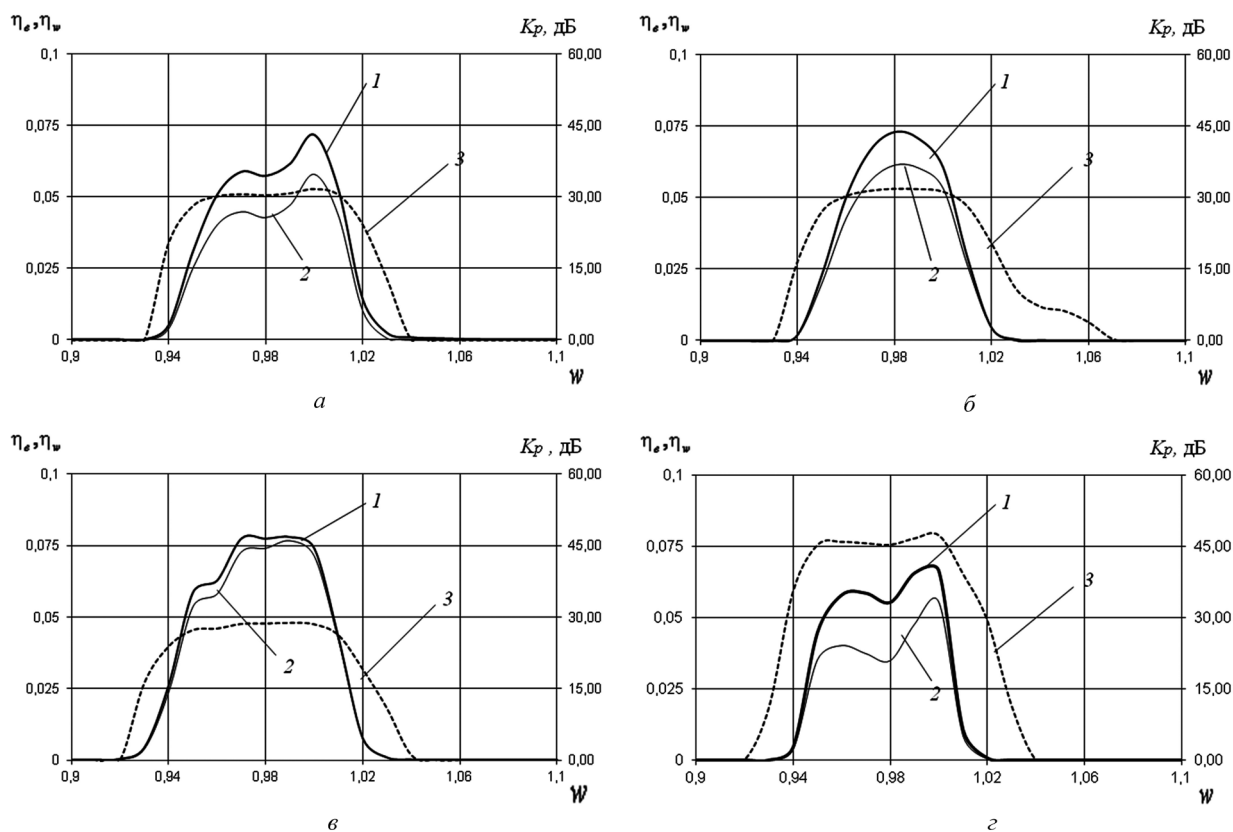


Рис. 4. Зависимости электронного, волнового КПД и коэффициента усиления по мощности K_p от относительной частоты ω двухсекционных (*а*, *б*) и трехсекционных (*в*, *з*) ЛБВ: кривая 1 – электронный КПД, кривая 2 – волновой КПД, кривая 3 – коэффициент усиления по мощности K_p ; *а* – вариант С2, $N = 60 + 60$, *б* – вариант С3, $N = 60 + 60$. *в* – вариант С4, $N = 45 + 45 + 45$, *з* – вариант С6, $N = 60 + 60 + 60$.

$I_0 = 0,1$ А. Коэффициент фазы эквивалентного четырехполосника 2 рад. Размеры волновода: $a = 0,8$ мм, $b = 0,12$ мм, $Z_w = 348$ Ом, $R = 0,09$ мм, $r = 0,07$ мм, $d = b$. Волновод изготовлен из меди с проводимостью $g = 57 \cdot 10^6$ См/м. В результате оптимизации параметров ЛБВ получены $K_p = 28,5$ дБ, $\eta_e = 0,074$, $\eta_w = 0,0713$, $P_{out} = 142$ Вт, $P_{in} = 0,2$ Вт. Частотные характеристики варианта С4 (с параллельным расположением секций, рис. 2, *б*) приведены на рис. 4, *в*, полоса частот усиления около 7%.

Рассчитана трехсекционная ЛБВ с последовательным расположением секций (вариант С5, $N = 45 + 45 + 45$). Ускоряющее напряжение $U_0 = 20$ кВ, $I_0 = 0,1$ А. Коэффициент фазы эквивалентного четырехполосника равен 2 рад. Размеры волновода, трубки дрейфа, электронного луча, как у варианта С4. В результате оптимизации параметров ЛБВ получены $K_p = 29$ дБ, $\eta_e = 0,0528$, $\eta_w = 0,036$, $P_{out} = 72$ Вт, $P_{in} = 0,09$ Вт. Как видно, эффективность этого варианта значительно ниже ($P_{out} = 72$ Вт), чем варианта С4 ($P_{out} = 142$ Вт).

Для повышения эффективности прибора рассчитана трехсекционная ЛБВ с последовательным расположением секций, но с увеличенным числом звеньев в каждой секции (вариант С6, $N = 60 + 60 + 60$). Ускоряющее напряжение $U_0 = 20$ кВ, $I_0 = 0,1$ А. Коэффициент фазы эквивалентного четырехполосника равен 2 рад. Размеры волновода, трубки дрейфа, электронного луча, как у варианта С4. В результате оптимизации параметров ЛБВ получены $K_p = 47,4$ дБ, $\eta_e = 0,0669$, $\eta_w = 0,0555$, ЛБВ $P_{out} = 111$ Вт, $P_{in} = 0,002$ Вт. Частотные характеристики варианта С6 (с последовательным расположением секций) приведены на рис. 4, *з*, полоса частот усиления около 8%.

Разность между значениями электронного и волнового КПД объясняется потерями в стенках волновода и часть мощности ЭМ-волны (примерно 0,1 и 3,2 Вт) рассеивается в поглощающих нагрузках на выходах первой и второй секций соответственно.

В представленных ниже вариантах приборов (варианты D1, E1, E2) задана повышенная плотность тока электронного пучка, заметно превышающая максимально достижимую плотность тока в современных электронно-оптических системах (ЭОС): во-первых, чтобы показать перспективность приборов терагерцового диапазона с улучшенными ЭОС; во-вторых, стимулировать работы по совершенствованию ЭОС с компрессией электронного пучка для терагерцовых приборов. Следует отметить, что в некоторых современных проектах по созданию ЛБВ на волнообразно изогнутом прямоугольном волноводе уже заметен прогресс в разработке улучшенных ЭОС с плотностью тока пучка до 600 А/см^2 [6]. Проверялось влияние отражений ЭМ-волн от изгибов волновода. Расчеты показали, что амплитуда отраженной волны составляет – 35–40 дБ, поэтому ее можно не учитывать, особенно если длины звеньев изогнутого волновода подобраны так, что отражения от соседних изгибов трансформируются в противофазе относительно друг друга.

Варианты ЛБВ для работы на частоте 600 ГГц. Проведены расчеты двухсекционной ЛБВ с большим коэффициентом усиления на длине волны $\lambda_0 = 0,05 \text{ см}$ ($f_0 = 599,5856 \text{ ГГц}$), в каждой секции по 41 звену (42 зазора) (вариант D1, $N = 42 + 42$, с последовательным расположением секций) (рис. 1).

Ускоряющее напряжение $U_0 = 12 \text{ кВ}$, $I_0 = 0,1 \text{ А}$. Размеры волновода: $a = 0,03 \text{ см}$, $b = 0,003 \text{ см}$, $Z_w = 136,4 \text{ Ом}$, $R = 0,001 \text{ см}$, $r = 0,0008 \text{ см}$, $d = b$. Волновод изготовлен из меди (без диэлектрического наполнения, $\epsilon = 1$) с проводимостью $g = 57 \cdot 10^6 \text{ См/м}$. В результате оптимизации параметров односекционной ЛБВ получены $K_p = 19,2 \text{ дБ}$, $\eta_e = 0,0005$, $P_{out} = 0,5 \text{ Вт}$, $P_{in} = 0,006 \text{ Вт}$.

Коэффициент фазы эквивалентных четырехполосников для первой и второй секций $K_\phi = 1,92 \text{ рад}$. Это вариант ЛБВ с длинными трубками дрейфа (в трубке дрейфа угол пролета электронов $11,2 \text{ рад}$). После оптимизации длин труб дрейфа двухсекционной ЛБВ получены $K_p = 39,6 \text{ дБ}$, $\eta_e = 0,00535$, $P_{out} = 5,45 \text{ Вт}$, $P_{in} = 0,0006 \text{ Вт}$. Проведены расчеты частотной характеристики двухсекционной ЛБВ с последовательным расположением секций в режиме большого сигнала при $P_{in} = 0,006 \text{ Вт}$.

По секциям усиление и выходная мощность в варианте D1 прибора перераспределились таким образом. На относительной частоте $w = 1$ K_p первой секции составляет $19,2 \text{ дБ}$, $\eta_e = 0,00048$, $P_{out} = 0,5 \text{ Вт}$, $P_{in} = 0,006 \text{ Вт}$. На этой же частоте на выходе второй секции $\eta_e = 0,0193$, коэффициент усиления второй секции равен $15,6 \text{ дБ}$, $P_{out} = 18,3 \text{ Вт}$, коэффициент усиления по мощности всего прибора составляет $K_p = 34,8 \text{ дБ}$.

Следует отметить заметное уменьшение усиления на относительной частоте $w = 1$ при большом входном сигнале (при $P_{in} = 0,006 \text{ Вт}$ получен $K_p = 34,8 \text{ дБ}$, при $P_{in} = 0,0006 \text{ Вт}$ получен $K_p = 39,6 \text{ дБ}$). Это свидетельствует о том, что при $P_{in} = 0,006 \text{ Вт}$ ЛБВ начинает работать в насыщении, т. е. режим работы ЛБВ становится нелинейным – усиление уменьшилось, но выходная мощность возрасла почти в 3 раза.

Варианты ЛБВ для работы на частоте 3 ТГц. Проведены расчеты двухсекционной ЛБВ с последовательным расположением секций (рис. 1), с большим коэффициентом усиления на длине волны $\lambda_0 = 0,01 \text{ см}$ ($f_0 = 3 \text{ ТГц}$). В каждой секции по 41 звену (число зазоров $N = 42$) (вариант E1, $N = 42 + 42$). Для первой секции выбран $K_\phi = 2,6165$, для второй секции $K_\phi = 1,3$. Это позволяет разнести по частоте «полосы генераций» в каждой секции и повысить устойчивость прибора к самовозбуждению.

Ускоряющее напряжение $U_0 = 12 \text{ кВ}$, $I_0 = 0,15 \text{ А}$. Размеры волновода: $a = 0,006 \text{ см}$, $b = 0,0005 \text{ см}$, $Z_w = 113,67 \text{ Ом}$, $R = 0,0002 \text{ см}$, $r = 0,00016 \text{ см}$, $d = b$. Критическая длина волны в волноводе $\lambda_{cr} = 0,012 \text{ см}$, длина волны в волноводе $\lambda_w = 0,0181 \text{ см}$. Волновод изготовлен из меди с проводимостью $g = 57 \cdot 10^6 \text{ См/м}$. Угол пролета электронов в трубке дрейфа составляет $5,6 \text{ рад}$. Для варианта E1 приведены зависимости коэффициента усиления по мощности K_p от относительной частоты $w = f/f_0$ рис. 5, а, кривая 1. На относительной частоте $w = 0,934$ K_p этого варианта двухсекционной ЛБВ равен $38,2 \text{ дБ}$, $\eta_e = 0,0134$, $P_{out} = 17,6 \text{ Вт}$ при $P_{in} = 0,0027 \text{ Вт}$.

В полосе относительных частот $1,08$ – $1,1$ наблюдается возбуждение прибора. Однако при уменьшении входной мощности до $0,0027 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$ амплитуда сигнала на этих частотах отсутствует, следовательно, прибор работал в режиме регенеративного усиления. Частотная характе-

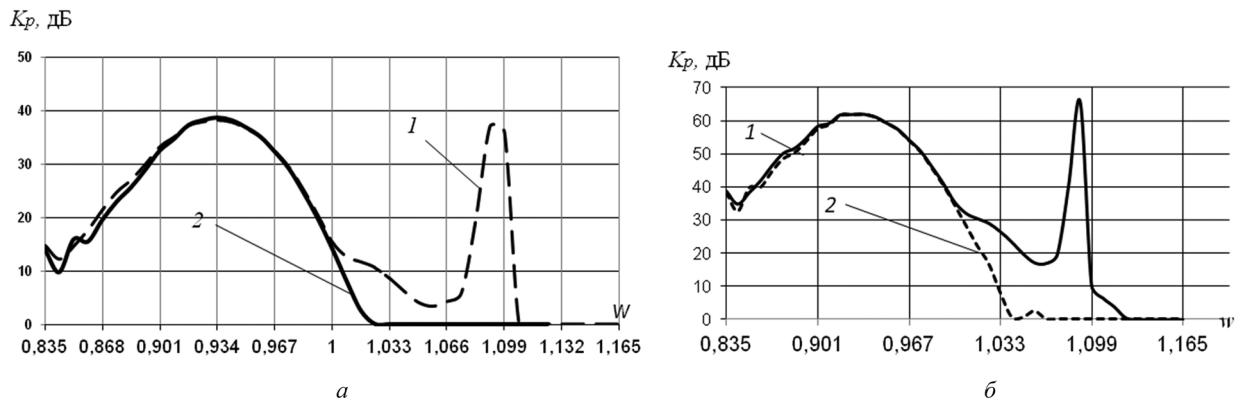


Рис. 5. Зависимости коэффициента усиления по мощности K_p от относительной частоты $w = f/f_0$, длина волны $\lambda_0 = 0,01$ см: кривая 1 – $P_{in} = 0,0027$ Вт; кривая 2 – $P_{in} = 0,0027 \cdot 10^{-5}$ Вт; а – двухсекционная ЛБВ, вариант E1, б – трехсекционная ЛБВ, вариант E2

ристика этого варианта приведена на рис. 5, а кривая 2. Полоса частот усиления составляет примерно 5–10% (150–300 ГГц) и прибор будет без возбуждения работать в режиме усиления, если величина частоты входного сигнала не выходит за пределы полосы относительных частот 0,84–1,06.

Проведены расчеты *трехсекционных ЛБВ* с последовательным расположением секций (рис. 1), с большим коэффициентом усиления на длине волны $\lambda_0 = 0,01$ см ($f_0 = 3$ ТГц), вариант E2. Параметры луча, размеры трубок дрейфа и волновода такие же, как и в варианте E1: ускоряющее напряжение $U_0 = 12$ кВ, $I_0 = 0,15$ А, число зазоров в секциях $N = 42$, (вариант E2, $N = 42 + 42 + 42$). Для первой секции выбраны коэффициенты фаз четырехполосников $K_\phi = 2,615$ рад, для второй и третьей секций $K_\phi = 1,3$ рад. Это позволяет разнести по частоте «полосы генераций» в каждой секции и уменьшает возможность прибора самовозбуждаться. Угол пролета электронов в трубке дрейфа составляет 5,7 рад.

На рис. 5, б приведены частотные характеристики трехсекционной ЛБВ варианта E2. На относительной частоте $w = 0,934$ коэффициент усиления по мощности K_p трехсекционной ЛБВ (вариант E2) равен 62 дБ, $\eta_e = 0,0071$, $P_{out} = 4,1$ Вт, $P_{in} = 0,0000027$ Вт.

В полосе относительных частот 1,08–1,11 наблюдается самовозбуждение прибора. Анализ режима работы ЛБВ на этих частотах показал, что самовозбуждение возникает в первой секции. При уменьшении входной мощности до $0,27 \cdot 10^{-7}$ Вт амплитуда сигнала на этих частотах отсутствует (рис. 5, б, кривая 2), следовательно, прибор работает в режиме регенеративного усиления. Полоса частот усиления составляет примерно 5–10% (150–300 ГГц).

Проведенные расчеты и исследования двух-, трехсекционных ЛБВ показали, что ЛБВ с длинными трубками дрейфа (в трубке дрейфа угол пролета электронов более 10 рад) имеют более узкую полосу усиления, чем ЛБВ с короткими трубками дрейфа (угол пролета электронов менее 6 рад).

Заключение. При использовании двухсекционных ЛБВ их характеристики (выходная мощность, коэффициент усиления, КПД, полоса частот усиления, если сравнить варианты В2 и В3, С2 и С3) незначительно зависят от схемы конструкции рис. 1 или рис. 2. При выборе той или иной схемы необходимо исходить из технологических возможностей. Схема с последовательным расположением секций (рис. 1) является однолучевой, поэтому проще в изготовлении, чем многолучевые приборы с параллельным расположением секций (рис. 2).

Если выполнить транспортировку пучка электронов на большое расстояние затруднительно (так может оказаться при использовании ЛБВ с последовательным расположением секций (рис. 1) с большим числом зазоров N), то следует выбрать конструкцию с параллельным расположением секций (рис. 2). Предложена новая конструкция трехсекционной ЛБВ с параллельным расположением секций на встречных пучках электронов (рис. 2, б), имеющая значительно лучшие выходные параметры, чем традиционная конструкция на попутных пучках (рис. 2, а). Использование

трехсекционных ЛБВ с последовательным расположением секций не всегда оправдано, так как часть мощности усиленной ЭМ-волны рассеивается в поглощающих нагрузках (рис. 1).

Как показали исследования, при проведении расчетов характеристик ЛБВ необходимо учитывать потери мощности ЭМ-волны в стенках волноводов. При увеличении коэффициентов фаз эквивалентных четырехполюсников от 1,5 до 2 рад полоса частот усиления уменьшается в 1,5–2 раза.

Двухсекционные ЛБВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах с последовательным расположением секций имеют расчетный коэффициент усиления 35–38 дБ, расчетную выходную мощность 15–18 Вт на частоте 3 ТГц. Трехсекционные ЛБВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах с последовательным расположением секций имеют расчетный коэффициент усиления 60–65 дБ, расчетную выходную мощность 3–4 Вт на частоте 3 ТГц.

Список использованной литературы

1. Аксенчик, А. В. Частотные характеристики ЛБВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах в субмиллиметровом диапазоне длин волн / А. В. Аксенчик, А. А. Кураев, И. Ф. Киринович // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2009. – № 3. – С. 113–124.
2. Аксенчик, А. В. Подавление самовозбуждения в ЛБВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах в субмиллиметровом диапазоне длин волн / А. В. Аксенчик, А. А. Кураев, И. Ф. Киринович // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2009. – № 4. – С. 102–110.
3. Аксенчик, А. Усилители и генераторы О-типа миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн (теория и оптимизация) / А. Аксенчик, А. Кураев, И. Киринович. – Germany: Palmarium Academic Publishing, 2014. – 154 с.
4. *Nguyen, Khanh*. Design of a High-Gain Wideband High-Power 220-GHz Multiple-beam Serpentine TWT / Khanh Nguyen [et al.] // 11-th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2010). – USA: Monterey. 2010. – P. 23–24.
5. *Tucek, John C.* 220 GHz Power Amplifier Development at Northon Grumman / John C. Tucek [et al.] // 12th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2012). – USA: Monterey. 2012. – P. 553–554.
6. *Cook, Alan M.* Serpentine waveguide 220 GHz millimeter wave amplifier cold test / Alan M. Cook [et al.] // 13th IEEE International Vacuum Electronics Conference 2012. USA: Monterey. 2012. – P. 547–548.
7. Аксенчик, А. В. Многосекционные ЛБВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах субмиллиметрового диапазона длин волн / А. В. Аксенчик, И. Ф. Киринович // Докл. БГУИР. – 2010. – № 6 (52). – С. 47–54.

Поступила в редакцию 09.04.2015