

УДК 621.385.6

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЛБВ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ

Н. А. Бушуев

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие „Алмаз“»

Статья поступила в редакцию 24 октября 2016 г.

Аннотация. В работе проведен аналитический обзор современного состояния разработок широкополосных ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, выполненных ведущими российскими предприятиями и зарубежными фирмами. Определены основные тенденции развития этих приборов. Получены приближенные аналитические выражения, позволяющие оперативно оценить изменение параметров ЛБВ с цилиндрическими и ленточными электронными пучками (геометрические размеры пролетного канала, ускоряющее напряжение, величину фокусирующего магнитного поля) при повышении частоты. Рассмотрены современные способы изготовления замедляющих систем терагерцового диапазона (фотолитография, DRIE, LIGA- и MEMS- технологии).

Ключевые слова: Лампы бегущей волны, замедляющая система, магнитная фокусирующая система, миллиметровый диапазон волн, терагерцовый диапазон, ленточные пучки.

Abstract. The work presents an analytical review of the current state of development of broadband TWT millimeter and sub millimeter ranges, made by leading Russian enterprises and foreign companies. The main trends in the development of these devices have been identified. Approximate analytical expressions for TWT to quickly assess changes in the parameters of cylindrical and ribbon electron beams (geometric dimensions of the transit channel, the accelerating voltage, the magnitude of the focusing of the magnetic field) when promoting them in the short-wave part of the millimeter range were found. The modern methods of manufacturing slow-wave terahertz systems (Photolithography, DRIE, LIGA- and MEMS technology were considered.

Key words: traveling wave tube, slow wave system, magnetic focusing system, millimeter wave band, terahertz band, sheet beam.

Введение

Лампы бегущей волны (ЛБВ) со спиральной замедляющей системой (ЗС), являются в настоящее время наиболее широкополосными усилителями среди электровакуумных СВЧ - приборов. О - типа средней мощности [1]. Они широко применяются в спутниковой радиоаппаратуре, применяемой в системах космической связи, метеонаблюдения, зондирования поверхности Земли, исследования объектов ближнего и дальнего космоса. Дальнейшее развитие систем космической навигации требует создания радиоаппаратуры, с более высоким разрешением и большей точности, в том числе для обнаружения, отслеживания космического мусора [2]. Поэтому в последние годы основное внимание сейчас уделяется созданию ЛБВ, работающих на частотах миллиметрового диапазона (50-75 ГГц), а также на более высоких частотах субмиллиметрового диапазона (90, 220, 460, 670 ГГц) [3]. На частотах от 3 до 65 ГГц наиболее распространение получили спиральные ЛБВ (рис.1).

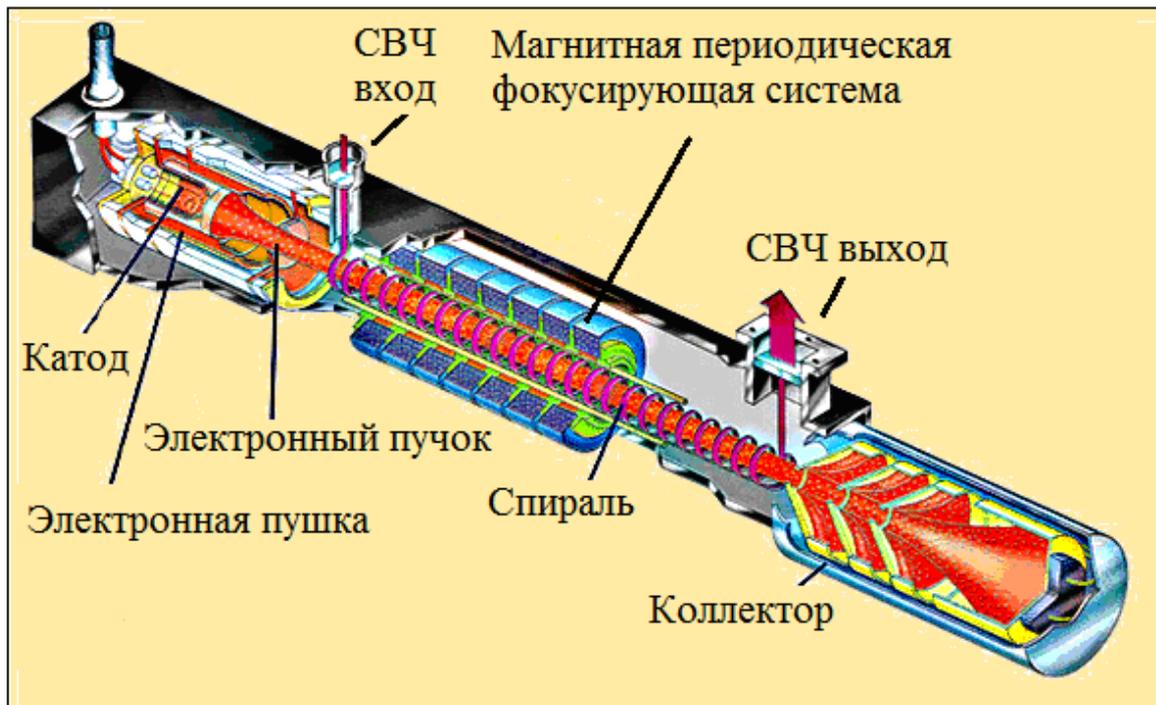


Рис. 1 Конструкция ЛБВ со спиральной замедляющей системой

Важнейшим узлом широкополосной ЛБВ является замедляющая система. Поэтому сначала рассмотрим особенности конструкций ЗС при продвижении их в коротковолновую часть миллиметрового диапазона.

1. Особенности конструкций замедляющих систем

Спиральная ЗС (рис.2) обычно состоит из собственно спирали (1) и трех керамических опор (2), которые закреплены на внутренней поверхности корпуса (3) методом «горячей посадки» в вакууме (рис.2а). На рис. 2б показана конструкция ЗС, в которой применены комбинированные опоры, состоящие из керамического стержня прямоугольного сечения 2 и металлического держателя 4, которые соединены между собой посредством термокомпрессионной сварки.

Для обеспечения эффективного взаимодействия в миллиметровом диапазоне электронов с СВЧ - полем ЗС должна иметь более крутую дисперсионную характеристику и большее сопротивление связи, чем в ЛБВ сантиметрового диапазона. В некоторых случаях это можно осуществить, как это показано на рис. 2с, путем перехода к схеме крепления ЗС на двух керамических опорах.

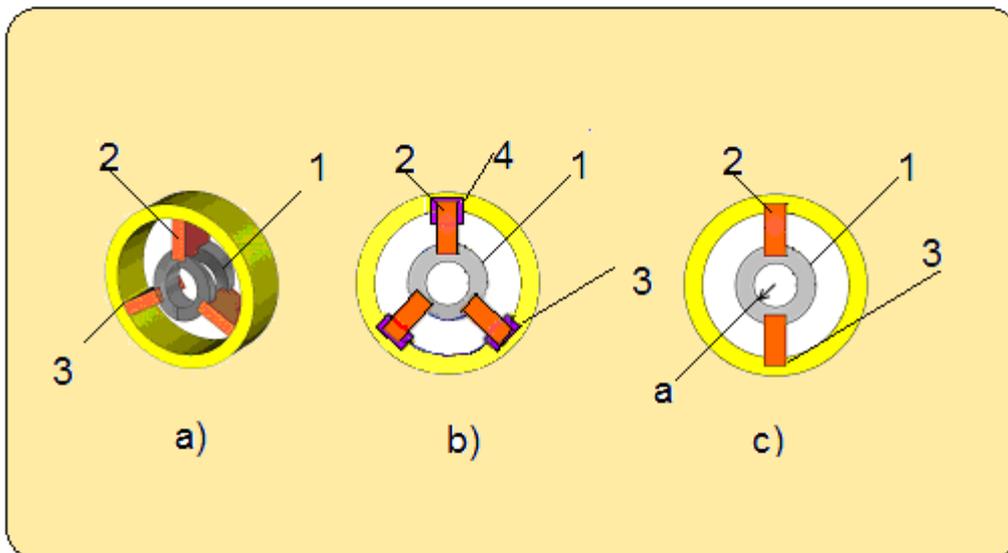


Рис. 2 Схемы крепления спирали на корпусе ЭС

Практика показывает, что ЛБВ со спиральной ЗС технически реализуема вплоть до частот 60—65 ГГц и уровня выходной мощностей порядка 20—30 Вт. На более высоких частотах необходимо применение замедляющих систем, отличающихся от спирали большей механической и, главное, теплорассеивающей способностью. К таким электродинамическим системам относятся, например, двойная гребенка (рис.3а) и петляющий волновод (micro fabricated folded waveguide -FWG), изображенный на рис.3б. Следует отметить, что эти ЗС более работают в более узкой, по сравнению со спиралью, полосе частот.

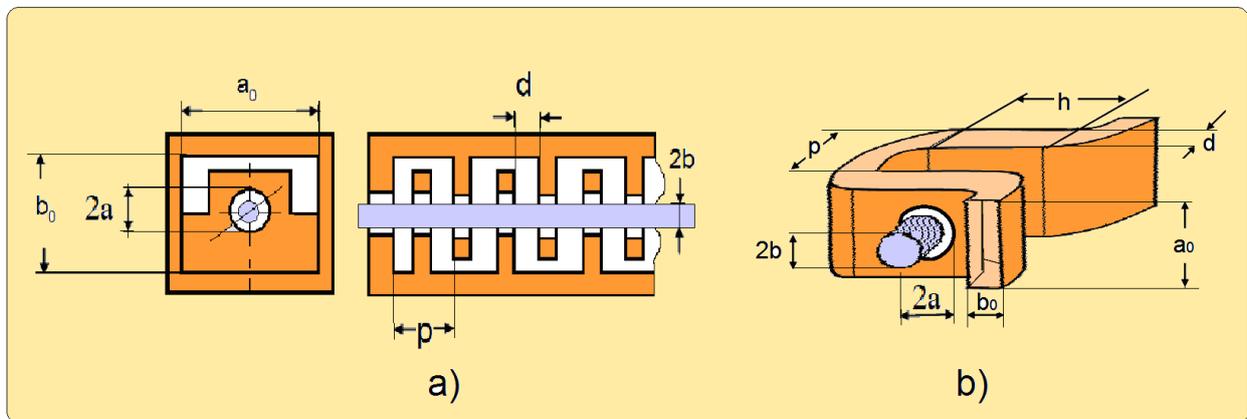


Рис.3. Замедляющие системы типа двойная гребенка и петляющий волновод для ЛБВ с цилиндрическим пучком

В сантиметровом диапазоне длин волн еще можно обеспечить изготовление ЗС, используя стандартные механические методы обработки их изготовления (фрезерование и микрофрезерование торцевыми фрезами, электроэрозионная обработка). Однако при технической реализации ЛБВ миллиметрового диапазона с цилиндрическим электронным потоком, начиная с частот 30-40 ГГц, возникает ряд серьезных проблем. Поэтому важно получить оценку поперечных размеров пролетного (внутреннего размера замедляющей системы) в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.

2. Оценка внутреннего поперечного размера замедляющей системы

Уменьшение поперечных размеров электронного пучка при увеличении

частоты связано, в первую очередь, с уменьшением приведенного внутреннего радиуса замедляющей системы γa , где $\gamma = (\beta_e^2 - k^2)^{1/2}$ – радиальное волновое число, $\beta_e = \omega/V_0$ – электронная постоянная распространения; $k = \omega/c$ – волновое число; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; $V_0 = 5.932 \cdot 10^5 \sqrt{U_0}$ [м/с] – скорость электронов.

При этом следует учитывать, что радиус пучка b должен быть выбран на 10 - 20 процентов меньше, чем радиус канала a . Отсюда возникает необходимость увеличения плотности тока $J_b = C_j J_k$ (где C_j – степень сжатия пучка, J_k – плотность тока на катоде, А/см²) и уменьшения его микропервееанса $P_\mu = I_0 \cdot 10^{-6} / U_0^{3/2}$, где I_0 – ток пучка; U_0 – ускоряющее напряжение. С повышением частоты уменьшается сопротивление связи, возрастают потери на скин - эффект и резко падает эффективность взаимодействия (электронный КПД η_e). В результате уменьшается выходная мощность прибора P_{out} . Поэтому при конструировании ЛБВ, работающих в коротковолновой части микроволнового диапазона, важно оценить степень влияния на выходную мощность различных параметров ЗС и электронного пучка.

3. Степень влияния параметров ЗС и электронного пучка на выходную мощность

Проблему уменьшения выходной мощности с повышением частоты для цилиндрического электронного пучка можно проиллюстрировать следующей формулой [4]:

$$P_{out} = \frac{1.72 \cdot 10^6 \eta_e \gamma b^{10} j_b^5}{f_G^{10} P_\mu^4}, \quad (1)$$

где f_G – средняя частота рабочего диапазона частот, ГГц.

Из формулы видно, что наибольшее влияние на мощность оказывают приведенный радиус электронного потока (γb^{10}) и плотность тока (j_b^5). Но верхний предел выбора γb ограничен условием $\gamma b = \gamma a (b/a) \leq 2 (b/a) \leq 1.5$, поэтому скомпенсировать резкое падение выходной мощности при увеличении частоты можно лишь за счет увеличения плотности тока в пучке и уменьшения

микропервеанса. Использование условия $\gamma b < 1.5$ связано с тем фактом, что аксиальное электрическое поле внутри спирали изменяется в радиальном направлении как $I_0(\gamma r)$, где I_0 является нулевым порядком модифицированной функции Бесселя первого рода и r – расстояние от оси. Чтобы сохранить эффективность взаимодействия на приемлемом уровне, желательно выбирать приведенный внутренний радиус замедляющей системы γa меньше, чем 2 радиана. При уменьшении радиуса пролетного канала требование обеспечения достаточно высокого токопрохождения (более 99 %) осложняется ограниченными возможностями реализации достаточно высоких величин индукции фокусирующего магнитного поля B_b .

4. Оценка влияния параметров цилиндрического электронного пучка на величину фокусирующего магнитного поля

Для пучка цилиндрического поперечного сечения величину B_b можно рассчитать по следующей формуле [5]:

$$B_b = \frac{K_b f_G p_\mu^{1/2}}{113.7 \gamma b} \quad (2)$$

где $K_b = 1,41$ - коэффициент превышения величины индукции над ее бриллюэновским значением.

Сделаем некоторые оценки по величине фокусирующего магнитного поля. Например, при постоянной величине микропервеанса $p_\mu = 0,1$ и $K_b = 2$ повышение рабочей частоты с 30 до 90 ГГц приведет к необходимости увеличения индукция с 0,221 Тл (при $\gamma b = 0.75$) до 0,57 Тл (при $\gamma b = 0.88$). Это вынуждает разработчиков уменьшать первеанс цилиндрического электронного пучка до значений $p_\mu < 0,1$ мкА/В^{3/2}. Как следствие, еще больше уменьшается параметр усиления Пирса, падает электронный коэффициент полезного действия (КПД), ухудшаются полосовые характеристики. Увеличения уровня выходной мощности можно добиться путем перехода от цилиндрического пучка к ленточному пучку.

5. Оценка влияния параметров ленточного электронного пучка на величину фокусирующего магнитного поля

Для ленточного пучка (рис.4) ширина пучка (коэффициент формы $N=w/b$) может превосходить его толщину $2b$ в несколько раз.

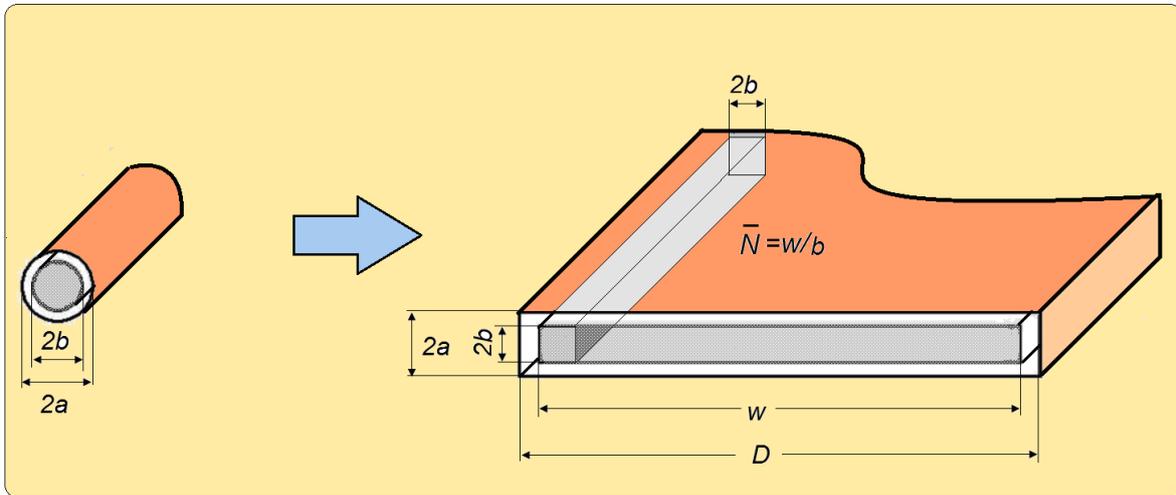


Рис.4 Переход от цилиндрической формы пучка к ленточной форме

Величину индукции фокусирующего магнитного поля для ленточного пучка \overline{B}_b можно рассчитать по формуле [5].

$$\overline{B}_b = \frac{K_b f_G p_{\mu l}^{1/2}}{128.4 \gamma b}, \quad (3)$$

где $p_{\mu l} = (10^{-6} \cdot I_0 / w) / U_0^{3/2}$ - удельный первеанс (первеанс на единицу ширины w ленточного пучка с полутолщиной b).

Таким образом, увеличивая ширину ленточного пучка (при удельном микропервеансе, равном микропервеансу электронного пучка круглого сечения и одинаковой величине фокусирующего магнитного поля) можно получить существенный прирост суммарного тока и, как следствие, увеличение выходной мощности ЛБВ. Основной проблемой при транспортировке широких ленточных электронных пучков в продольном магнитном поле является возникновение диокотронной неустойчивости [6]. Одним из путей подавления диокотронной неустойчивости является применение МПФС [7]. Следует также учесть, что при применении магнитной периодической фокусирующей

системы величину индукции \overline{B}_b необходимо увеличить в $\sqrt{2}$ раз. Кроме того пучок, движущийся в периодическом магнитном поле сильно восприимчив к механическим смещениям [8].

Для работы ЛБВ в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне требуется применение «плоских» ЗС, способных эффективно взаимодействовать с ленточным электронным потоком [9].

6. Особенности конструкций ЛБВ для миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов

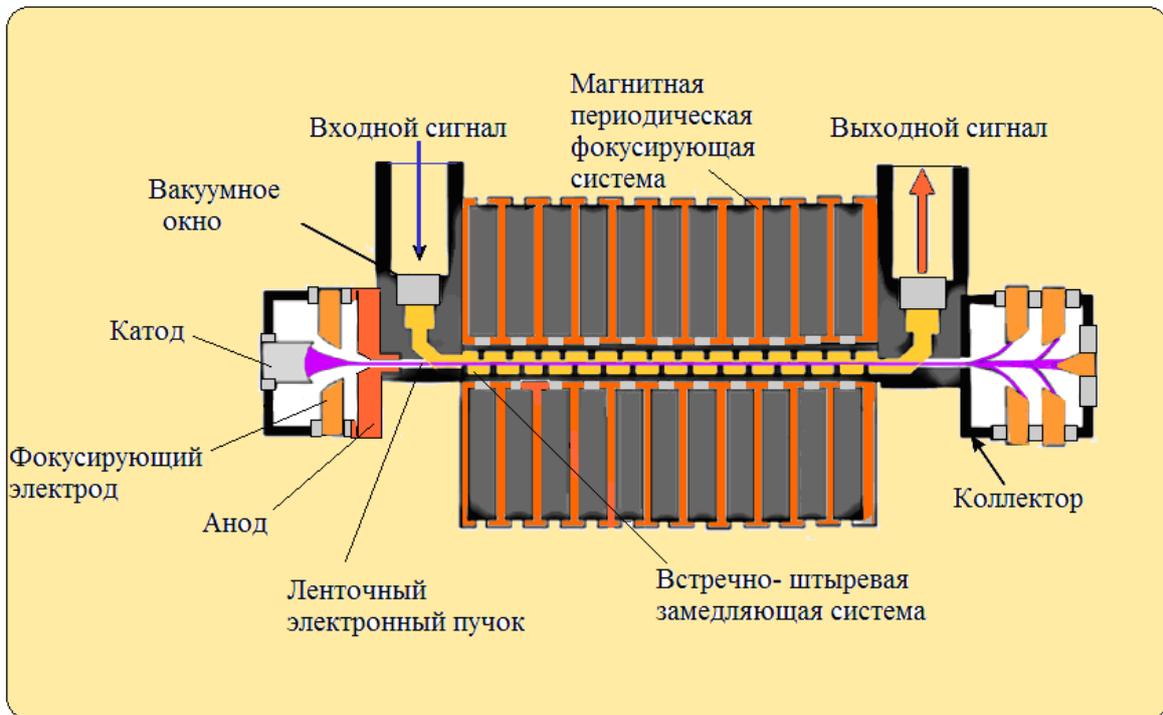


Рис.5 Схематическое изображение конструкции ЛБВ терагерцового диапазона

На рис. 5 изображена конструкция ЛБВ терагерцового диапазона со встречно-штыревой ЗС. В этом диапазоне могут также применяться ЗС типа одиночной (а) и сдвоенной (б) гребенки, петляющий волновод (с), изображенные на рис.6.

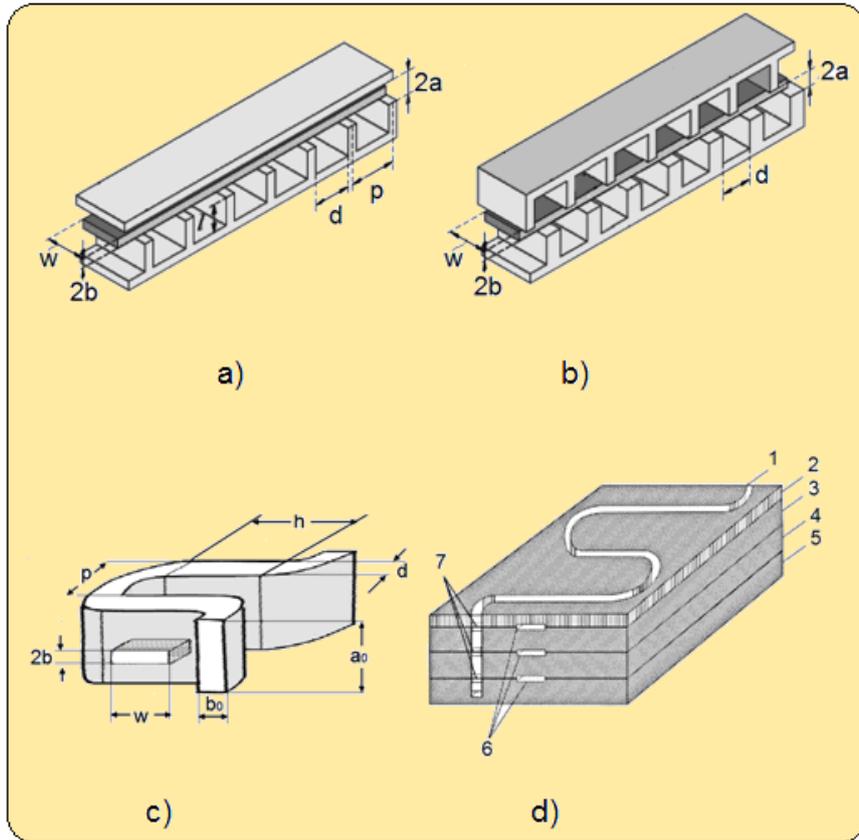


Рис.6 Схемы ЗС, предназначенные для взаимодействия с ленточным потоком

Чрезвычайно большая величина магнитного поля, необходимая для осуществления периодической фокусировки ленточного электронного пучка малой толщины на частотах выше 100 ГГц, заставляет уменьшать его микроперванс, что приводит к снижению электронного КПД и выходной мощности ЛБВ, чему способствует и быстрый рост собственных распределенных потерь ЗС. На начальном этапе проектирования ЛБВ разработчика важно иметь ориентировочные значения рабочих параметров прибора. Такие приближенные оценки были получены в результате обобщения многочисленных экспериментальных и расчетных данных, опубликованных в отечественной и зарубежной научной литературе.

7. Эмпирические выражения для выбора параметров режима и конструкции замедляющей системы

Зависимости параметра γa и характерного поперечного размера

пролетного канала a_{mm} , также выходной мощности ЛБВ от частоты можно описать следующими приближенными эмпирическими выражениями:

$$\gamma a \approx 0,228 \ln(f_G) + 0,73, \quad (4)$$

$$a_{mm} \approx 7,45 / f_G + 0,1; \quad (5)$$

$$P_{out} \approx 2300 / f_G - 6.8; \quad (6)$$

где a_{mm} - характерный размер пролетного канала в мм, f_G - частота в ГГц, P_{out} - выходная мощность, выраженная в Вт. Изменение γa , a_{mm} и выходной мощности ЛБВ в разных диапазонах частот показано ниже в таблице 1.

Таблица 1. Изменение выходной мощности и параметров ЛБВ от частоты

Диапазон рабочих частот/ /выходная мощность	Радиус a_{mm} , мм	γa , рад
«С» – (3.4-4.2 ГГц/ 600 Вт.)	2,06	1,03
«Ku» – (10.7-13 ГГц/190 Вт.)	0,73	1,29
«K/Ка» – (18-32 ГГц/85,2 Вт.)	0,40	1,46
«Q»- (38-42 ГГц/50,7 Вт.)	0,29	1,57
«V» – (60-65 ГГц/30 Вт.)	0,22	1,67
«W» – (95 ГГц/17,40 Вт.)	0,18	1,77
«Sub – mm»- (300 ГГц/0,9 Вт.)	0,125	2,03

Графики зависимостей параметров замедляющей системы γa и a_{mm} , а также индукции магнитного поля от частоты, рассчитанные по формулам (2)-(5), показаны также на рис. 7.

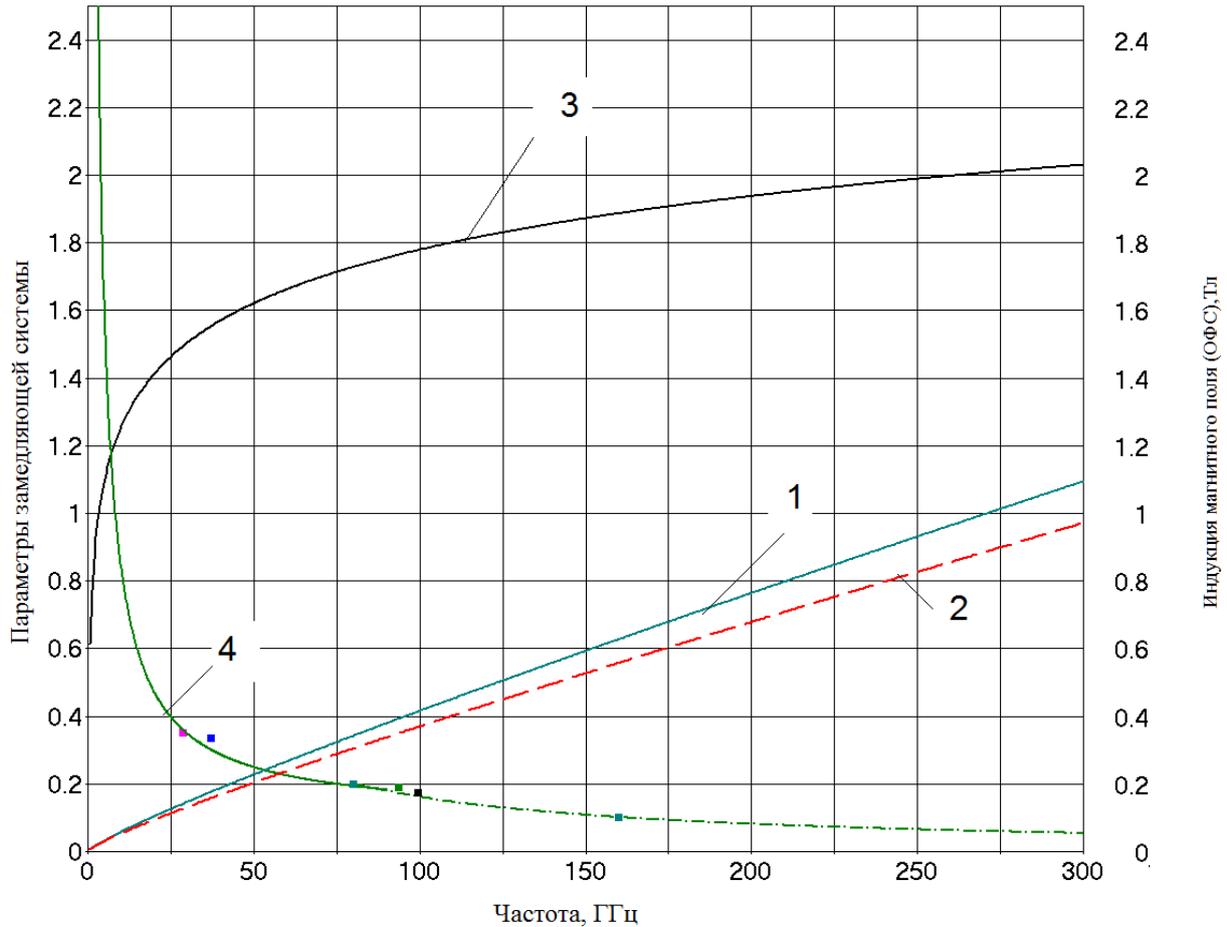


Рис. 7 Зависимости параметров замедляющей и фокусирующей систем ЛБВ от частоты: 1 – индукция фокусирующего магнитного поля для цилиндрического пучка ($p_{\mu 1} = p_{\mu} = 0,1 \text{ мкА/В}^{3/2}$ и $b/a = 0,75$; $K_{\epsilon} = 2$), 2- индукция фокусирующего магнитного поля для ленточного пучка (при $p_{\mu 1} = p_{\mu} = 0,1 \text{ мкА/В}^{3/2}$ и $b/a = 0,75$; $K_{\epsilon} = 2$); 3- приведенный размер пролетного канала (γa); 4- характерный размер пролетного канала (при $p_{\mu 1} = p_{\mu} = 0,1 \text{ мкА/В}^{3/2}$ и $b/a = 0,75$ и $K_{\epsilon} = 2$), выраженный в мм.

С использованием полученных выше выражений было также найдено приближенное аналитическое выражение для определения величины ускоряющего напряжения

$$U_{0kv} = A_9 F_G^9 - A_8 F_G^8 + A_7 F_G^7 - A_6 F_G^6 + A_5 F_G^5 - A_4 F_G^4 + A_3 F_G^3 - A_2 F_G^2 + A_1 F_G, \quad (7)$$

где U_{0kv} - напряжение в кВ, а коэффициенты полинома приведены в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициента полинома, входящие в уравнение (7).

A_9	A_8	A_7	A_6	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1
$\frac{4,993}{10^{19}}$	$\frac{7,348}{10^{16}}$	$\frac{4,60628}{10^{13}}$	$\frac{1,604}{10^{10}}$	$\frac{3,39185}{10^8}$	$\frac{4,4703}{10^6}$	$\frac{3,6197}{10^4}$	$\frac{1,6774}{10^2}$	0.456

График зависимости ускоряющего напряжения от частоты приведен на рис.8.

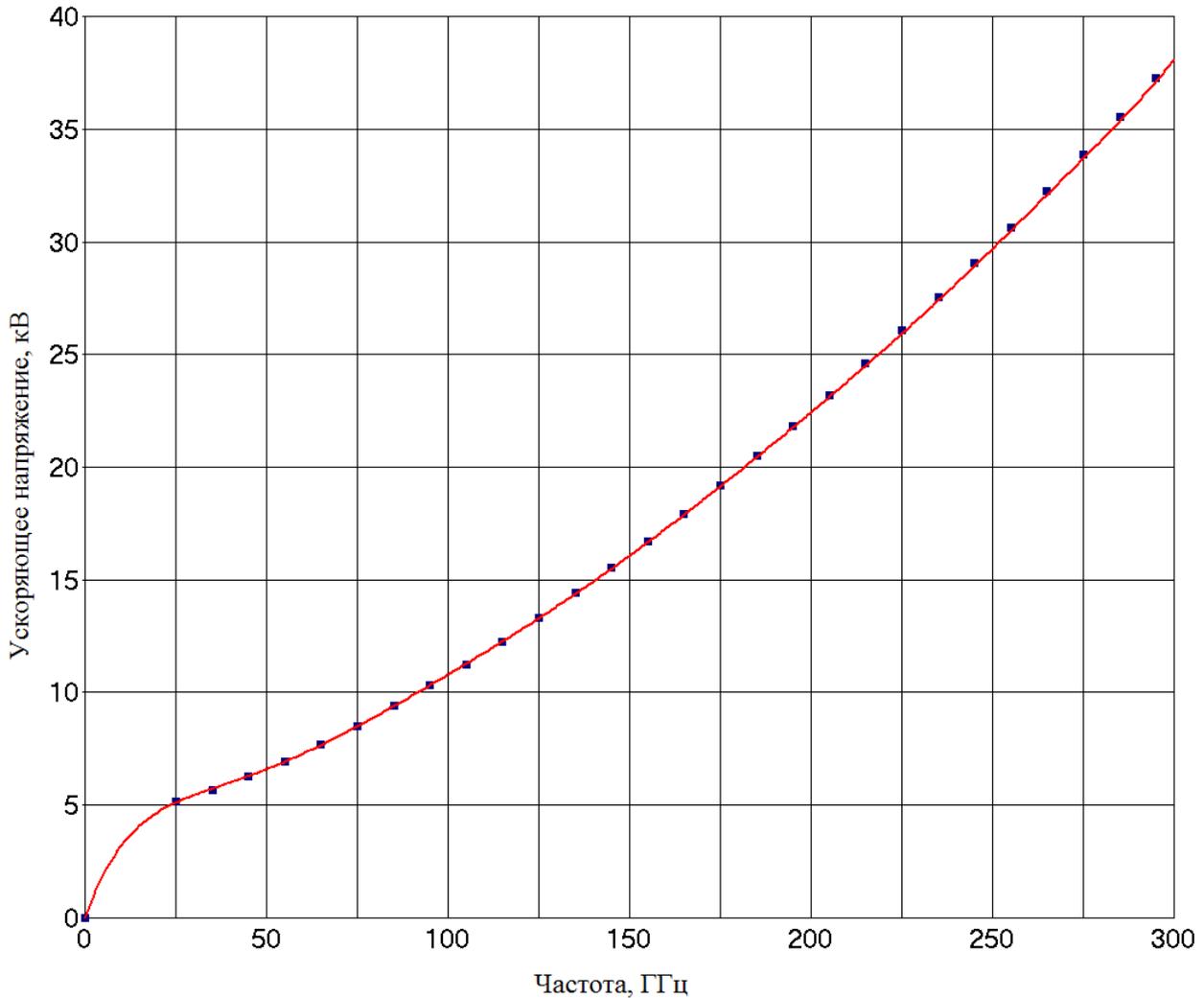


Рис.8 Зависимость ускоряющего напряжения от частоты

Можно оценить достоверность расчетов по приближенной формуле (7), если сравнить их с результатами численного моделирования ЛБВ, предназначенной для работы на частоте 220 ГГц [10]. В этой работе установлено, что для получения выходной мощности 67.3 Вт при токе 0,08 А необходимо ускоряющее напряжение 25 кВ. Расчет ускоряющего напряжения

по формуле (7) дает аналогичные результаты. Полученные выражения не претендуют на высокую точность, тем не менее, они сокращают время проектирования ЛБВ на начальном этапе ее разработки.

Из таблицы 1 следует, что для однопучковых ЛБВ, работающих на частоте 300 ГГц, предельная выходная мощность не превышает 1 Вт. Поэтому важно наметить пути увеличения уровня выходной мощности ЛБВ, работающих в терагерцовом диапазоне частот.

8. Пути повышения уровня выходной мощности ЛБВ терагерцового диапазона

Одним из новых путей повышения уровня выходной мощности ЛБВ и величины ускоряющего напряжения в субмиллиметровом диапазоне длин волн является переход к многопучковым ЛБВ с использованием ЗС типа «сверхразмерного петляющего волновода», возбуждаемого на высшей моде колебаний - H_{0m} (где m -число полуволн, укладываемых вдоль широкой стенки волновода) [11]. На рис. 5d представлено схематическое изображение пакетированной ЗС многопучковой ЛБВ, теоретически исследованной в работе [11]: где 1 - волновод на волне H_{40} ; 2, 3, 4, 5 — спаянные вместе пластины, составляющие анодный блок; 6 — каналы для пролета электронных пучков ленточной формы; 7 — области пучностей электрического поля волны H_{m0} .

Число зазоров, равное числу изогнутых секций волновода, $n = 80$. В результате численной оптимизации параметров многопучковой ЛБВ, работающей на частоте 600 ГГц при ускоряющем напряжении $U_0 = 9.1$ кВ, токе электронного пучка $I_0 = 0.01$ А, числе пучков $N_b = 4$, получен коэффициент усиления по мощности $K = 13.8$ дБ, электронный КПД = 0.89%, выходная мощность $P_{out} = 0,457$ Вт.

Для создания таких замедляющих систем в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн требуется применение новых методов изготовления, поскольку при использовании традиционной технологии не удастся выдерживать требуемые допуски. Кроме того, шероховатость

поверхности элементов усилителя на частотах ТГц-диапазона становится сопоставимой с глубиной скин-эффекта, что приводит к значительному росту потерь в ЗС. К таким методам относятся: фотолитография, глубокое реактивное ионное травление и микромашинные методы обработки. Рассмотрим кратко эти методы, останавливаясь на их достоинствах и недостатках.

9. Методы изготовления замедляющих систем

9.1 Фотолитография

Фотолитография (Photolithography- Litho) использует ультрафиолетовое (UV) оптическое излучение для передачи рисунка с фотошаблона на светочувствительный фоторезист. По сравнению с другими способами она является хорошо изученным, более дешевым и производительным процессом, для всех этапов которого в микроэлектронной промышленности разработаны разные виды оборудования [12]. Схема фотолитографического процесса приведена на рис.9.

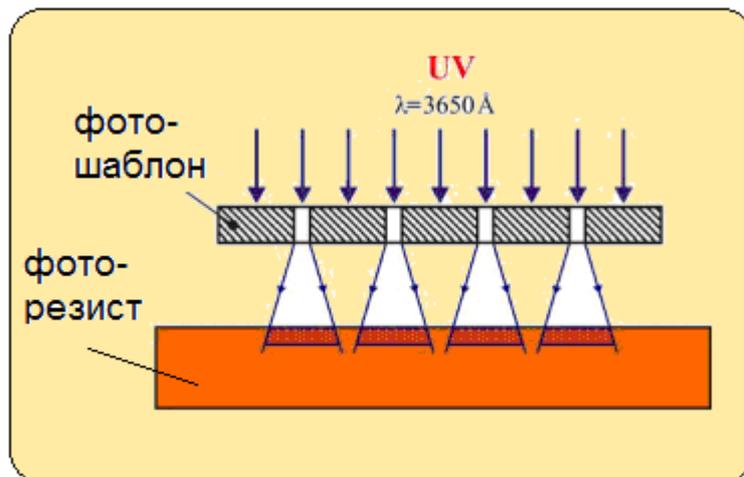


Рис.9 Схема фотолитографического процесса

Видно, что из-за большой длины волны ультрафиолетового (UV) излучения происходит искажение изображения на фоторезисте. Поэтому с помощью этого процесса трудно обеспечить совмещение и воспроизведение на фоторезисте двумерного рисунка фотошаблона с точностью в пределах $\pm 15\%$ от номинального размера его элементов и с 5%-ным допуском на требуемый

наклон краев. Для обеспечения повторяемости и воспроизводимости параметров ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов требуется соблюдение более жестких допусков на геометрические размеры ЗС. Одним из таких способов является глубокое реактивное травление DRIE (Deep Reactive Ion Etching) [13].

9.2 Глубокое реактивное ионное травление

От традиционной объемной микрообработки процесс DRIE отличается только тем, вместо влажного химического травления для создания фигур на подложке используется плазменное травление (рис.10).

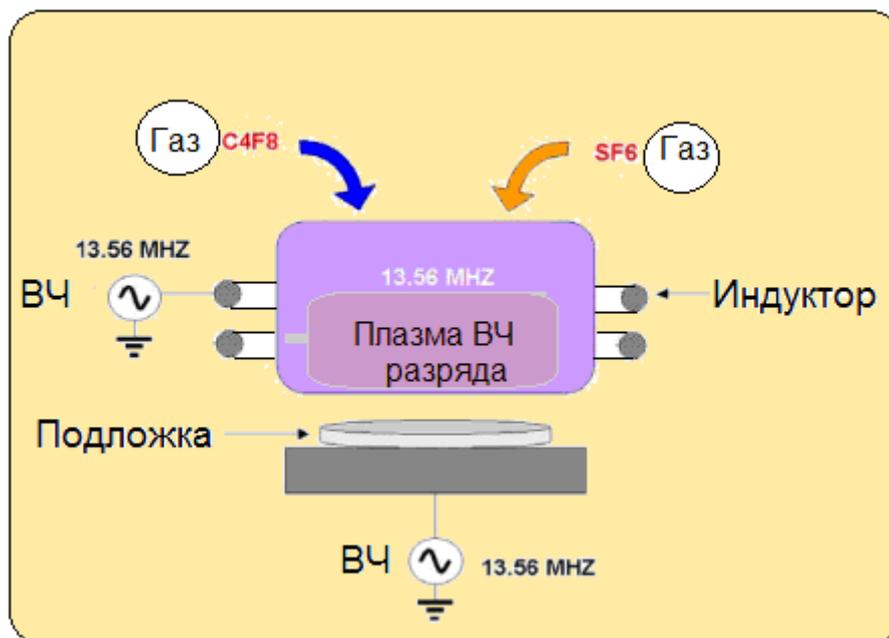


Рис. 10 Схема глубокого реактивного ионного травления

Это позволяет намного гибче управлять профилями травления и существенно расширить ассортимент изготавливаемых элементов. Производственное оборудование для ионного травления весьма дорого, поэтому и приборы, созданные по технологии DRIE, как правило, дороже приборов, сделанных с использованием традиционного метода фотолитографии.

При переходе в короткий миллиметровый диапазон эти методы изготовления ЗС слишком грубы. В последнее время появились новые более

тонкие технологии изготовления микроизделий, например такие, как LIGA – процесс (Roentgen Lithography Galvanik Abformung – комбинация рентгеновской литографии, гальванотехники и формовки) и различные МЭМС-технологии с технологическими допусками менее 1 мкм (рис. 11).

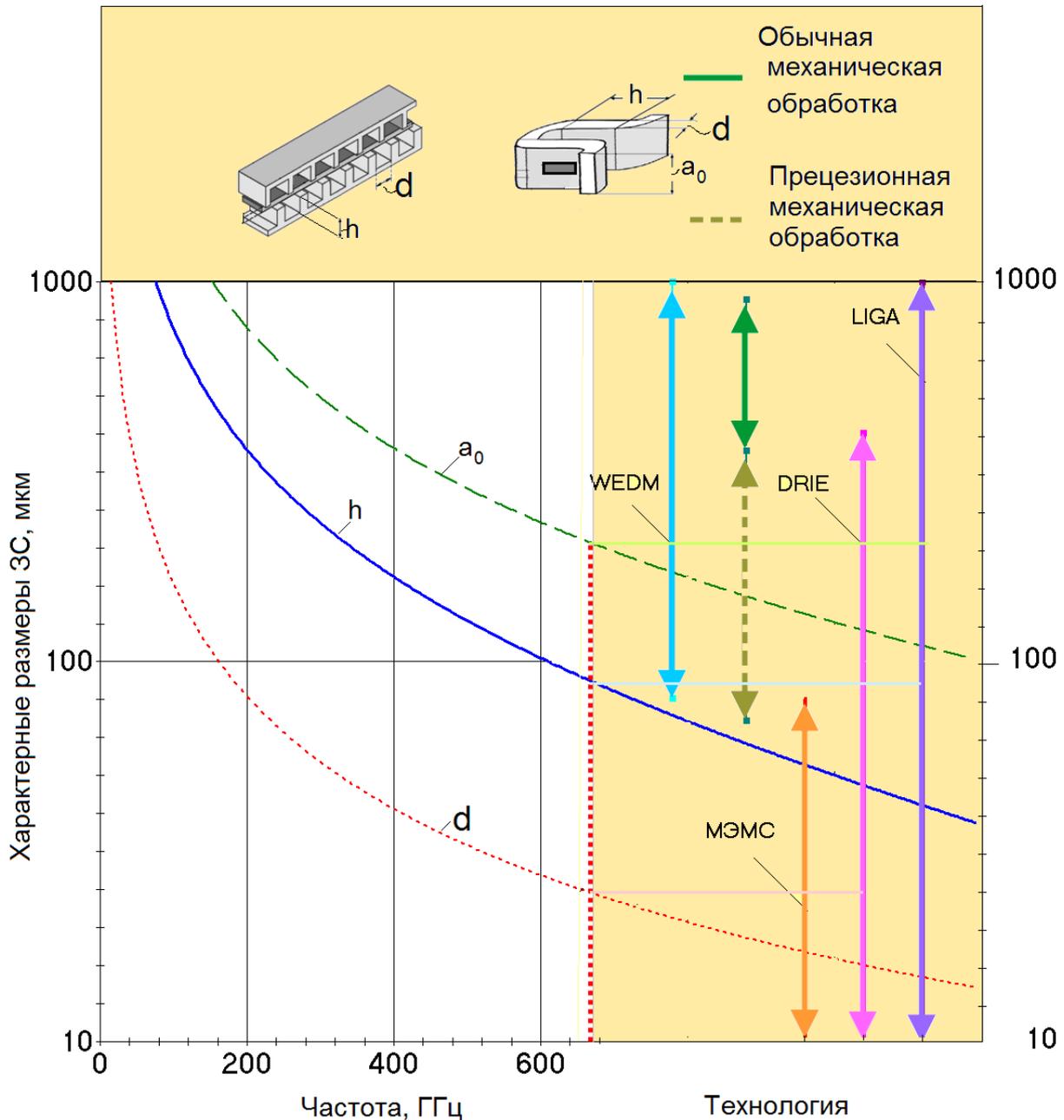


Рис.11 Технологические возможности изготовления ЗС различными методами

9.3 LIGA-технология

LIGA-технология (аббревиатура немецких слов: Lithographie (литография), Galvanoformung (гальваноосаждение) и Abformung

(микроформирование)), основана на последовательности процессов литографии, гальваноосаждения и микроформирования [14]. Этот процесс, схема которого изображена на рис. 12, предлагает широкий спектр материалов для создания ультраточных трехмерных элементов ЗС с вертикальными боковыми сторонами, толщиной до 100-1000 мкм и поперечными размерами в пределах нескольких микрон.

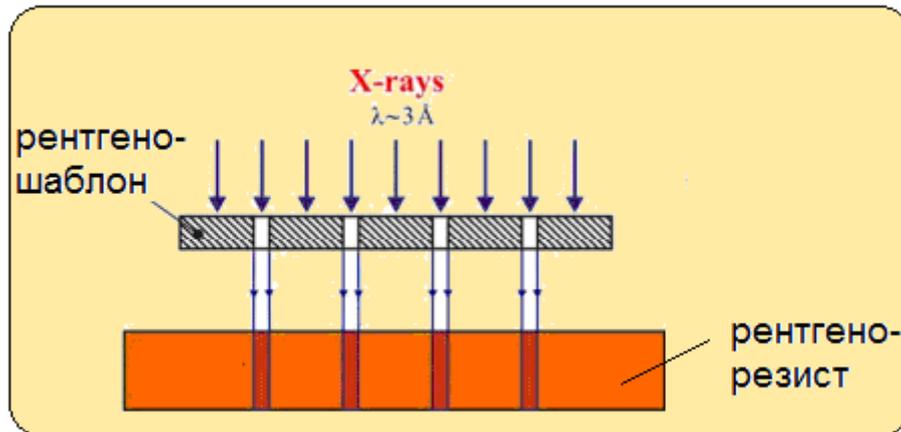


Рис. 12 Схема LIGA-технологического процесса

Создание фотоэлектронного рисунка производится с использованием рентгеновских лучей от синхротрона, которые проходят через толстый слой рентгено- резиста с очень маленькой боковой экспозицией. Синхротронное излучение имеет сверхмалый угол расходимости пучка (0,0060), поэтому формируется пучок параллельных рентгеновских лучей (X-rays). LIGA по точности и пространственному разрешению, высокому аспектному отношению, малой шероховатости внутренней и боковых стенок превышает возможности любых других технологий микроструктурирования. Существуют также некоторые вариации LIGA-технологии, когда дорогостоящая и занимающая много времени, рентгено-литография заменяется электронно-лучевой или лазерной литографией.

9.4. МЭМС-технология

В ТГц диапазоне размеры ЗС находятся на уровне 10 микрон. Такая система может быть изготовлена по технологии МЭМС (Micro-

electromechanical systems -MEMS) [15]. Эта технология предусматривает микрообработку ЗС с применением микро- механической системы, состоящей из ультрамелких механических движущихся элементов, интегрированных в единую систему с микропроцессором, выполненным на одном кристалле- SoC (Systems- on- a-Chip). Схема МЭМС-системы показана на рис. 13.

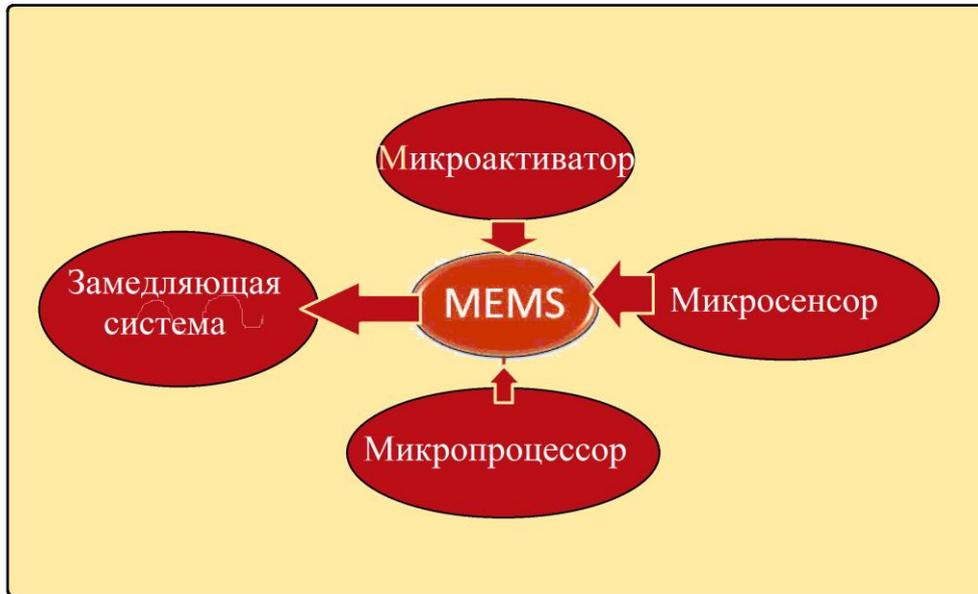


Рис.13 Схема МЭМС- системы

Например для изготовления ЗС- ЛБВ- усилителя с ленточным лучом на диапазон 0,22 ТГц в работе рассматривались три разновидности МЭМС- технологии, которые обеспечивали допуски размеров 3-5 мкм и значение шероховатости поверхности не более 30 нм [12]. Оценка технологических возможностей различных систем представлена в таблице 3.

Таблица 3. Возможности различных технологий при изготовлении ЗС

Параметры	LIGA	DRIE	MEMS
Интервал обработки по вертикали, мкм	5-1000	2-400	1-80
Минимальный горизонтальный размер, мкм	10	0.5	2-3
Коэффициент формы пучка N	100:1	100:1	5:1
Допуск, мкм	1-2	0.5	<1

10. Выводы

Рассмотрены современное состояние разработок и проанализированы тенденции развития ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов частот. Отмечено, что из-за малых размеров замедляющих структур резко падает эффективность взаимодействия и уровень выходной мощности этих приборов. Показано, что продвижение в коротковолновую часть миллиметрового диапазона в значительной мере связано с поиском и реализацией эффективных конструкций основных ее узлов, и в первую очередь замедляющей системы.

Получены приближенные аналитические выражения, позволяющие оперативно оценить изменение параметров ЛБВ с цилиндрическими и ленточными электронными пучками (геометрические размеры пролетного канала, ускоряющее напряжение, величину фокусирующего магнитного поля) при продвижении их в коротковолновую часть миллиметрового диапазона.

Рассмотрены также современные способы изготовления замедляющих систем терагерцового диапазона (фотолитография, DRIE, LIGA- и MEMS-технологии). Представленный в обзоре опыт ведущих фирм может быть полезен разработчикам при выборе направлений исследований по созданию эффективных широкополосных ЛБВ- усилителей коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Литература

1. A. Staprans, E. W. McCune, and J. A. Ruetz, "High power linear-beam tubes," Proceedings of the IEEE, vol. 61, no. 3, pp. 299–330, 1973.
2. G. K. Kornfeld, E. Bosch, W. Gerum, and G. Fleury, "60-GHz space TWT to address future market," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 48, no. 1, pp. 68–71, 2001.

Tucek, J., M. Basten, D. Gallagher, and K. Kreischer, "Sub-millimeter and THz power amplifier development at Northrop Grumman," IEEE Int. Vacuum Electron. Conf., 19, Monterey, USA, May 21–24, 2010.

3. J. H. Booske, D. R. Whaley, W. L. Menninger, R. S. Hollister, and C. M. Armstrong, Traveling-wave tubes, in Modern Microwave and Millimeter-Wave Power Electronics, R. J. Barker et al., Ed. New York: Wiley-Interscience, 2005, ch. 4, pp. 171–245.
4. Царев, В. А. Магнитные фокусирующие системы электровакуумных микроволновых приборов О-типа: учеб. пособие /В. А. Царев, Р. В. Спиридонов. - Саратов: Изд-во "Новый ветер" , 2010.
5. Rosker M. J. Background, Program Objectives and Structure.– High Frequency Integrated Vacuum Electronics Industry Day Meeting, Arlington, 24 July 2007. http://www.darpa.mil/mto/solicitations/baa07-49/HiFIVE_Overview.pdf.
6. Ruan C., Wang S., Han Y. et al. Theoretical and experimental investigation on intense sheet electron beam transport with its diocotron instability in a uniform magnetic field // IEEE Trans. Electron Devices. – Vol. 61. – № 6. – 2014. – PP. 1643-1650.
7. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки- М.: Советское радио, 1966.- 231 с.
8. Y.-M. Shin, A. Baig, L. R. Barnett, W.-C. Tsai and N. C. Luhmann, "System design analysis of a 0.22-THz sheet-beam traveling-wave tube amplifier", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 59, № 1, PP. 234-240, Jan. 2012.
9. Shi, X., Z. Wang, X. Tang, T. Tang, H. Gong, Q. Zhou, W. Bo, Y. Zhang, Z. Duan, Y. Wei, Y. Gong, and J. Feng, "Study on wideband sheet beam traveling wave tube based on staggered double vane slow wave structure." IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 42, №. 12, 3996–4003, 2014.
10. Xianbao Shi, Laxma R. Billa1, Yubin Gong, and all. High Efficiency and High Power Staggered Double Vane TWT Amplifier Enhanced by Velocity-Taper Design// Progress In Electromagnetics Research, Vol. 66, 39–46, 2016.
11. Аксенчик А.В. Многопучковые лампы бегущей волны О-типа субмиллиметрового диапазона длин волн/А.В. Аксенчик//Доклады БГУИР; научный журнал.-2013.-№ 5.- С. 48-54.

12. Введение в фотолитографию / под ред. В. П. Лавринцева. М.: Энергия, 1977. 400 с.
13. www.ece.umd.edu/class/enee416.../report6.pdf
14. Fabrication of microstructured optical elements for visible light by means of LIGA-technology / B. G. Goldenberg [et al.] // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Sec. A. - 2009. - Vol. 603, № 1/2: Proceedings of the XVII International Synchrotron Radiation conference: SR-2008, Novosibirsk, Russia, June 15-20, 2008. - P. 157-159.
15. MEMS technologies and applications. - SPIE PRESS. 2000, Vol. PM85, - 516 p.
16. MEMS and Nanotechnology Exchange. —www.mems-exchange.org (дата обращения: 04.10.2016).
17. Xianbao Shi, Laxma R. Billa¹, Yubin Gong, and all. High Efficiency and High Power Staggered Double Vane TWT Amplifier Enhanced by Velocity-Taper Design// Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 66, 39–46, 2016.