

**Каретникова Т.А.^{1,2}, Рожнев А.Г.¹, Рыскин Н.М.^{1,2},
Торгашов Г.В.², Шалаев П.Д.³**

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

² Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН

³ АО «НПП «Алмаз»

Исследование миниатюрных приборов О-типа терагерцевого диапазона с ленточным электронным потоком

Представлены результаты исследований, направленных на создание миниатюрных приборов О-типа с ленточным электронным пучком в терагерцевом диапазоне. Приведены результаты расчета электродинамических параметров замедляющих систем (ЗС) в виде плоских гребенок в волноводе, а также расчеты коэффициента усиления в режимах малого и большого сигнала. Разработан технологический маршрут создания ЗС с помощью электроискровой технологии, созданы макеты ЗС в диапазоне 0.2 ТГц.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, ленточный пучок, терагерцевый диапазон.

В настоящее время среди приборов вакуумной СВЧ электроники значительный интерес представляют миниатюрные усилитель и генераторы диапазона 0.1-1 ТГц. К числу наиболее перспективных конструкций относятся приборы О-типа (лампы бегущей и обратной волны) с плоскими ленточными электронными пучками и замедляющими системами (ЗС) в виде гребенок, размещенных на широких стенках прямоугольного волновода (см., например, [1-3]). Схематическое изображение ЗС с электронным пучком приведено на рис. 1. Авторы данной работы в течение ряда лет ведут разработку подобных приборов в диапазоне 0.2 ТГц [4-8].

Для моделирования режимов усиления и генерации, прежде всего, необходимо рассчитать холодные электродинамические параметры ЗС (дисперсию, сопротивление связи, затухание). Для решения этой задачи был разработан программный пакет, основанный на методе интегрального уравнения [4], обеспечивающий столь же высокую точность, что и современные универсальные 3D-пакеты (HFSS, COMSOL и др.), но значительно превосходящий их по быстродействию. В результате были подобраны оптимальные геометрические размеры замедляющих систем, обеспечивающие широкую полосу пропускания и приемлемое сопротивление связи [5,6]. В качестве примера в таблице 1 приведены размеры ЗС типа двойной гребенки с противофазным расположением гребней.

На рис. 2 представлены результаты расчетов дисперсии и сопротивления связи для ЗС в виде двух гребенок, сдвинутых на половину периода ($w = d/2$), и для симметрично расположенных гребенок ($w = 0$). Синхронизм между электронным пучком и (+1)-й прямой пространственной гармоникой реализуется при напряжениях пучка порядка 20 кВ для диапазона частот 190–235 ГГц. Отметим, что линия дисперсии электронного пучка также пересекает и дисперсионную характеристику обратной гармоники, что может привести к возникновению паразитной генерации в системе.

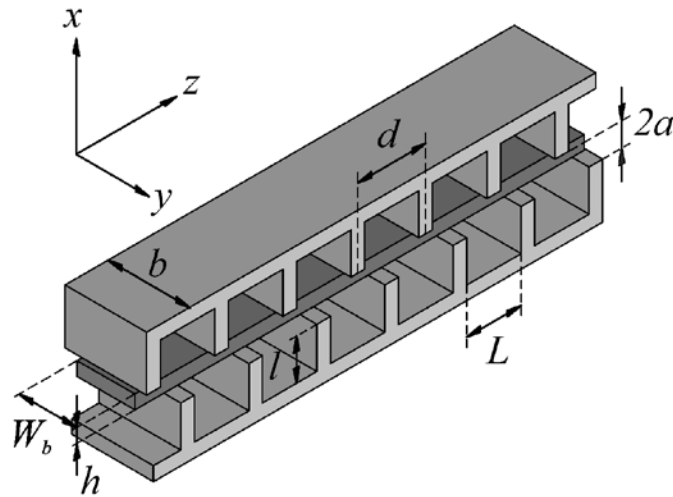


Рис. 1. Схематическое представление пространства взаимодействия.

Таблица 1. Геометрические размеры ЗС в виде сдвоенных гребенок (в мкм)

Период структуры d	500	Поперечная ширина структуры b	850
Толщина штыря s	100	Относительный сдвиг гребенок w	250
Высота пролетного канала $2a$	200	Толщина пучка h	100
Глубина ламели l	300	Ширина пучка W_b	750

Для работы в режиме ЛБВ-усилителя оптимальным является такое расположение гребенок, когда они сдвинуты относительно друг друга точно на половину периода системы (черные сплошные линии на рис. 2а). При этом полосы пропускания двух нижних мод системы смыкаются друг с другом, что обусловлено наличием скользящей плоскости симметрии [9].

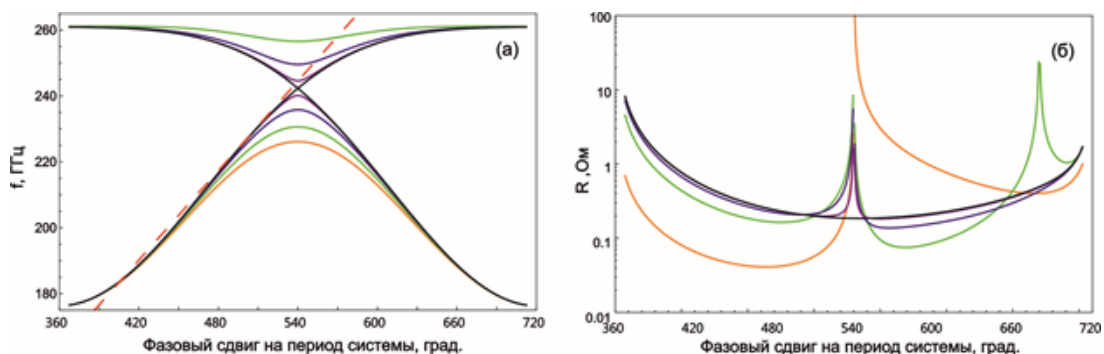


Рис. 2. Дисперсионные характеристики (а) и сопротивления связи прямой гармоники (б) для двойной гребенки при различных сдвигах $w = 250$ мкм, 230 мкм, 187.5 мкм, 125 мкм, 0 мкм. Штриховой линией на рис. (а) показана дисперсионная характеристика электронного пучка при напряжении 20 кВ.

При другом расположении гребенок (относительный сдвиг $w \neq d/2$) дисперсионные характеристики трансформируются и между ними образуется полоса непропускания.

Разрыв дисперсионных характеристик происходит за счет исчезновения скользящей плоскости симметрии. Вследствие этого на дисперсионных кривых появляются точки экстремума, в которых групповые скорости для обеих мод становятся равным нулю. Соответственно, сопротивления связи прямой и обратной гармоник вблизи этих точек стремятся к бесконечности. Ширина полосы непропускания растет с уменьшением сдвига w . На рис. 2 приведены характеристики для различных значений w .

На рис. 2б приведены зависимости усредненного по поперечному сечению пучка сопротивления связи прямой гармоники от частоты. Как видно из рисунка, сопротивление связи ЗС в виде гребенок, сдвинутых ровно на полпериода, больше, чем для симметрично расположения гребенок.

Значения сопротивления связи для обратной гармоники меньше, чем для прямой, примерно на один-два порядка и при выбранных размерах пучка не превышают 0.01 Ом практически во всем диапазоне за исключением узких областей в окрестности критических частот.

Таким образом, для усилителя прямой волны оптимальной представляется ЗС со сдвинутыми на полпериода гребенками. Систему с симметричным расположением гребенок можно использовать при взаимодействии с обратной волной. В этом случае можно повысить сопротивление связи, сдвигая пучок в сторону одной из гребенок [7]. Однако более целесообразно использовать ЗС в виде одиночной гребенки, для которой, как показывают расчеты [7] сопротивление связи и ширина полосы пропускания оказываются несколько больше.

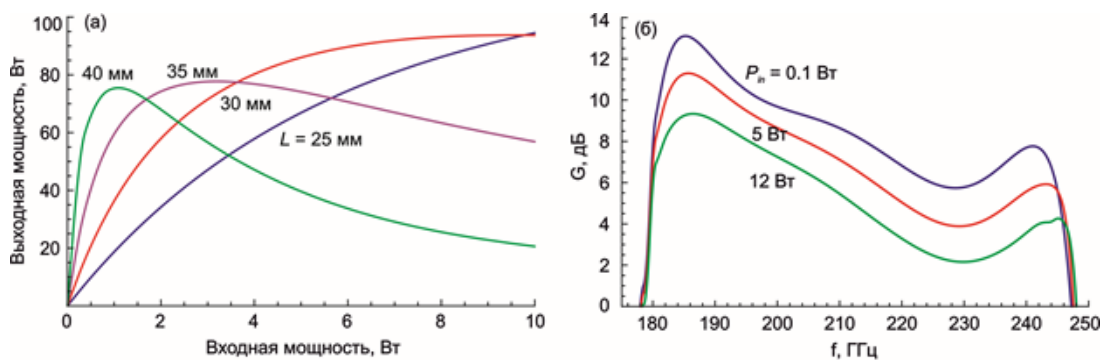


Рис. 3. Амплитудные характеристики ЛВВ при частоте входного сигнала 185 ГГц (а) и амплитудно-частотные характеристики (б) при различных значениях входной мощности.

Моделирование усиления в нелинейном режиме проводилось с помощью 1D варианта программы [9]. Ток пучка составляет 100 мА, напряжение — 20 кВ. На рис. 3а приведены зависимости выходной мощности от входной при различных длинах пространства взаимодействия, а на рис. 3б — частотные зависимости коэффициента усиления при различных мощностях входного сигнала (длина ЗС 25 мм). Как видно из рис.3б, при увеличении входной мощности форма зависимости коэффициента усиления от частоты сохраняется, но из-за увеличения влияния нелинейных эффектов его величина уменьшается. При увеличении длины ЗС (см. рис.3а), мощность, при которой наступает насыщение, значительно уменьшается (1 Вт при длине системы 40 мм). Однако при увеличении длины системы могут возникнуть проблемы с транспортировкой электронного пучка.

Проводились экспериментальные исследования с целью определения возможности применения электроискровой технологии для создания штыревых замедляющих структур. Установлено, что наиболее подходящими при изготовлении встречно-штыревых

замедляющих структур ТГц диапазона являются пластины или полосы из меди вакуумной плавки марки МВИ. По результатам экспериментальных исследований были выбраны оборудование и электроды-инструменты для электроискрового изготовления ЗС, определены параметры режимов электроискровой обработки заготовок, разработан технологический маршрут изготовления узла штыревой ЗС. Были изготовлены макеты ЗС с размерами, приведенными в Таблице 1. На рис.4 приведена фотография макета и ее увеличенный фрагмент.

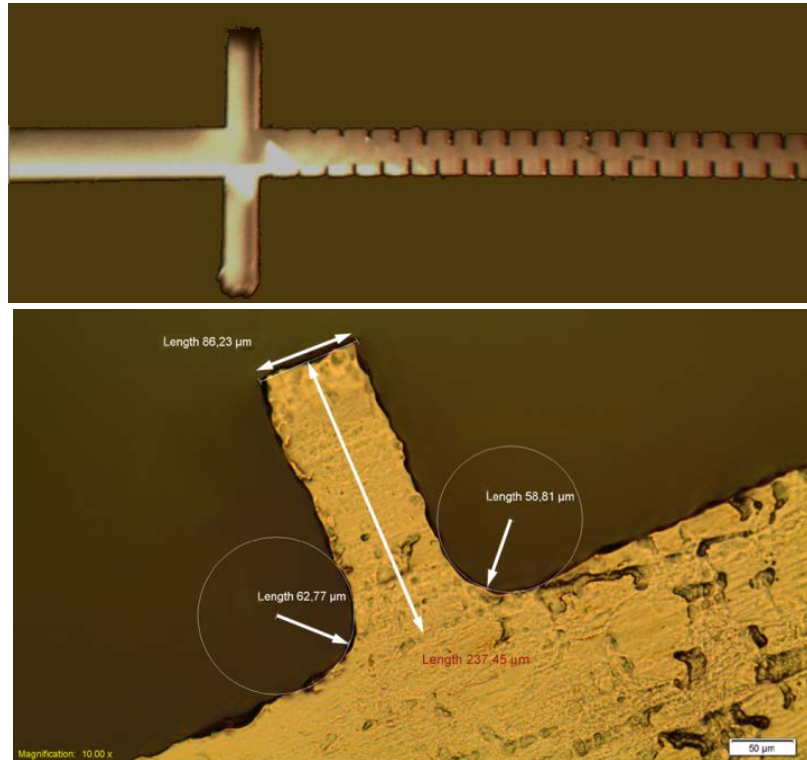


Рис. 4. Фотография макета ЗС и ее увеличенный фрагмент

Таким образом, проведенные расчеты свидетельствуют о том, что при токе пучка порядка 100 мА ЛБВ усилитель с ленточным электронным пучком позволяет получить усиление 10-15 дБ в диапазоне 0.2 ТГц. Мощность в режиме насыщения составляет 80-100 Вт, однако достигается она при достаточно больших уровнях мощности входного сигнала. Проведены технологические исследования, направленные на создание макета ЗС при помощи электроискровой технологии. Также был разработан катод с высокой плотностью тока (свыше 100 А/см²), показана возможность фокусировки пучка однородным продольным магнитным полем без его существенной деформации и токооседания [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № 1463, выполняемый в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности № 2014/203) и РФФИ (гранты № 16-08-00450 и № 14-02-00976).

Библиографический список

1. Shin Y.-M., Baig A., Barnett L.R., Tsai W.-C., Luhmann N.C. System design analysis of a 0.22-THz sheet-beam traveling-wave tube amplifier // IEEE Trans. Electron Devices. 2012. Vol. 59. No. 1. P. 234-240.
2. Joye C.D., Calame J.P., Cook A.M., Garven M. High-power copper gratings for a sheet-beam traveling-wave amplifier at G-band // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. Vol. 60. No. 1. P. 506-509.

3. Baig A., Gamzina D., Barchfeld R., et al. 0.22 THz wideband sheet electron beam traveling wave tube amplifier: Cold test measurements and beam wave interaction analysis // *Phys. Plasmas*. 2012. Vol. 19. No. 9, 093110.
4. Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Каретникова Т.А., Торгашов Г.В., Сеницын Н.И., Шалаев П.Д., Бурцев А.А. Исследование характеристик замедляющей системы лампы бегущей волны миллиметрового диапазона с ленточным электронным пучком // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2013. Т. 56, № 8-9. С. 601-613.
5. Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., et al. Modeling of eigenwaves in single- and double-vane slow-wave structures for sheet-beam sub-THz devices // *15th IEEE Internat. Vacuum Electronics Conf. Monterey, CA, USA, April 22-24, 2014*, pp. 493-494.
6. Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Karetnikova T.A., et al. Modeling of a double-grating sub-THz sheet-beam amplifier // *39th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and THz Waves. Tucson, AZ, USA, September 14-19, 2014*.
7. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Торгашов И.Г., Сеницын Н.И. Вопросы разработки усилителей и генераторов О-типа субтерагерцевого диапазона частот // *Радиотехника*. 2014. № 10. С. 46-51.
8. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Сеницын Н.И., Григорьев Ю.А., Бурцев А.А., Шалаев П.Д. Моделирование лампы бегущей волны субтерагерцевого диапазона с замедляющей системой типа сдвоенной гребенки и ленточным электронным пучком // *Радиотехника и электроника*. 2016. Т. 61. № 1. С. 54-60.
9. Rozhnev A.G., Ryskin, N.M., Sokolov et al. New 2.5D Code for Modeling of Nonlinear Multisignal Amplification in a Wide-band Helix Traveling Wave Tube // *Fifth IEEE Int. Vac. Electr. Conf. (IVEC2004)*. 2004. Monterey, USA. P.144-145.