

**Т.А. Каретникова¹, А.Г. Рожнев¹, Н.М. Рыскин^{1,2},
Г.В. Торгашов², Н.И. Сеницын², П.Д. Шалаев³**

¹Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН

³АО «НПП «Алмаз»

Моделирование взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем в ЛБВ-усилителе субтерагерцового диапазона с замедляющей системой типа сдвоенная гребенка

В докладе представлены результаты моделирования с помощью точного и быстрого метода расчета электродинамических параметров и коэффициента усиления замедляющей системы в виде двойной гребни в прямоугольном волноводе для проектируемого ЛБВ-усилителя в диапазоне 0.2 ТГц.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, плоский пучок, источники терагерцового диапазона

Одна из перспективных конструкций миниатюрного ЛБВ-усилителях субтерагерцового и терагерцового диапазонов состоит из замедляющей системы (ЗС) в виде сдвоенных гребенок, размещенных на широких стенках прямоугольного волновода и плоского электронного пучка [1-3]. Для расчета режимов усиления в таком приборе в 1D-приближении необходимо знать электродинамические параметры системы (дисперсию, сопротивление связи, затухание), а также получить выражение для вычисления поля пространственного заряда. Последнее требование сводится к вычислению коэффициента редукции поля пространственного заряда. Электродинамические параметры были рассчитаны с помощью быстрого и точного программного кода, основанного на методе интегрального уравнения [4], в результате чего были подобраны оптимальные геометрические размеры замедляющей системы (рис. 1), обеспечивающие широкую полосу пропускания и максимально возможное сопротивление связи [5,6]. Эти размеры приведены в таблице 1.

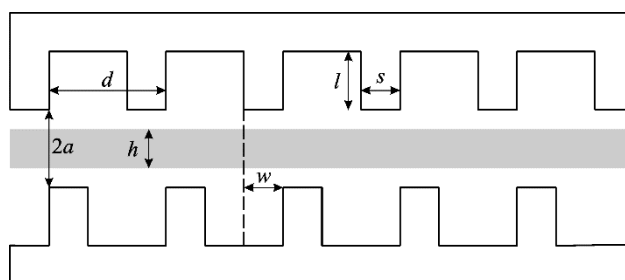


Рисунок 1. Схематичное преставление пространства взаимодействия

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 h	750

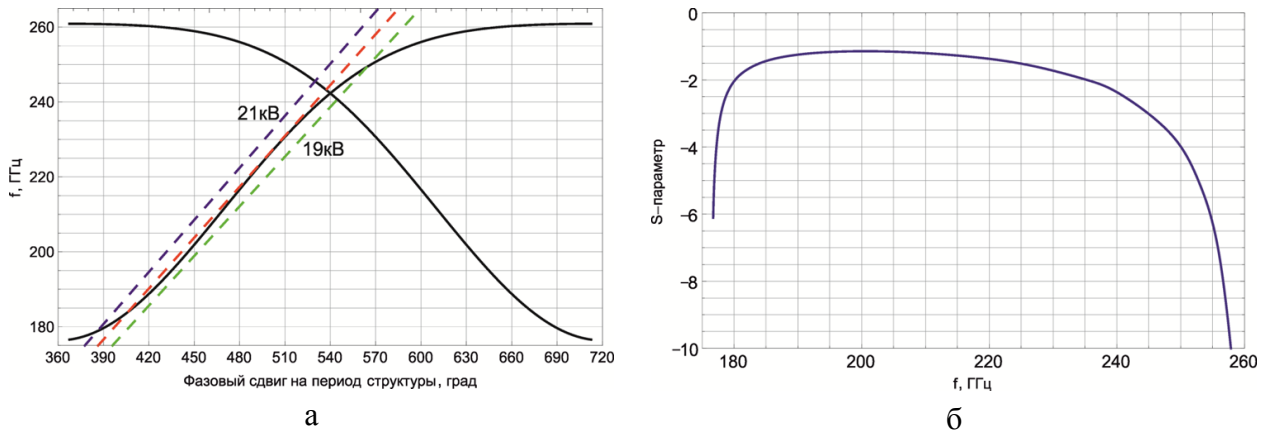


Рисунок 2. Дисперсионная характеристика системы (а), зависимость параметра S_{21} от частоты (б)

На рис. 2а представлена дисперсионная характеристика для случая сдвига гребенок, относительно друг друга на полпериода, что обеспечивает эффективное взаимодействие с прямой волной (+1)-ой пространственной гармоники в режиме усиления. При выбранных параметрах достигается холодная полоса пропускания рабочей моды около 70 ГГц и максимальное значение усредненного по сечению пучка сопротивления связи для (+1)-ой пространственной гармоники в случае, когда пучок расположен симметрично в пролетном канале. На рис. 2а также пунктиром приведены дисперсионные характеристики пучка в кинематическом приближении для различных значений ускоряющего напряжения 19, 20 и 21 кВ. При $V = 20$ кВ пучок и прямая гармоника находятся в синхронизме в большей части полосы частот.

Усредненное по сечению сопротивление связи сдвоенных гребенок достаточно мало и не достигает значения в 1 Ом в большей части полосы пропускания, за исключением областей близких к частотам отсечки [4-6]. Его величину можно увеличить за счет уменьшения высота пролетного канала или толщины штырей, однако технология изготовления структуры накладывает ограничения на минимальные значения этих параметров.

Для моделирования взаимодействия электронного пучка с полем в ЛБВ необходимо также знать частотную зависимость коэффициента затухания волны в ЗС без пучка. Расчет затухания в периодической структуре проводился по формуле, которая получается методом возмущений, аналогично тому, как это делается в случае однородных волноводов [7]. Коэффициент затухания на одном периоде ЗС определяется выражением

$$\alpha = \frac{0.5 R_{\text{пов}} \iint |H_{\tau}|^2 dS}{2 \nu_{gp} \bar{W}} d,$$

где \bar{W} – средняя энергия, запасенная на одном периоде, ν_{gp} – групповая скорость, $R_{\text{пов}} = \sqrt{\mu_0 \omega / (2\sigma)}$ – поверхностное сопротивление металла, σ – проводимость металла, интеграл в числителе берется по одному периоду системы. Для учета шероховатости стенок величина σ выбиралась в 2-3 раза меньше табличного значения для меди (в расчетах $\sigma = 2 \times 10^7$ [Ом⁻¹м⁻¹]). Коэффициент прохождения сигнала через холодную систему связан с

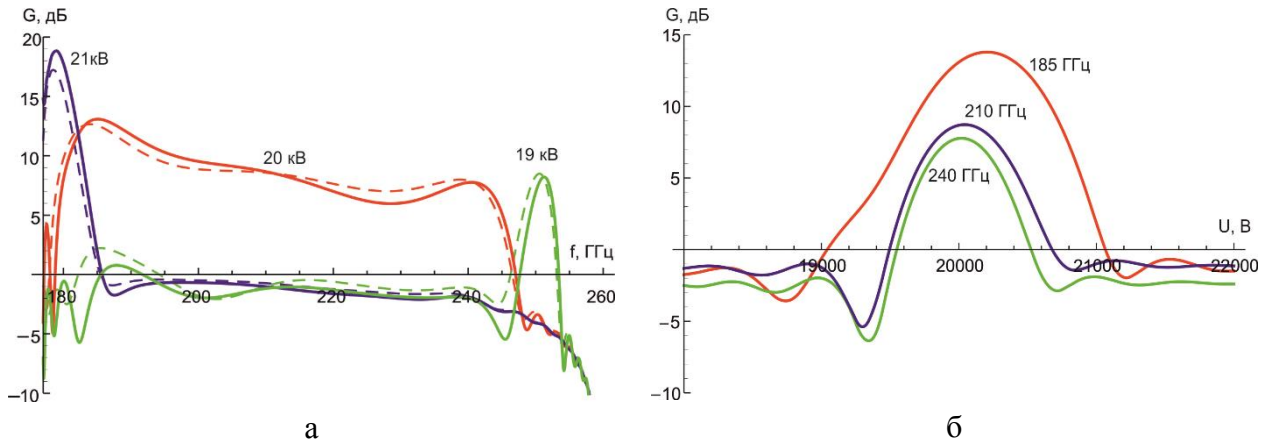


Рисунок 3. Зависимость коэффициента усиления от частоты (а) и напряжения (б)

коэффициентом затухания α формулой $S_{21}(\text{дБ}) = 8.686 \alpha N$, где N - количество периодов. График зависимости величины S_{21} от частоты приведен на рисунке 2б. Как из него следует, в большей части полосы пропускания полное затухание в системе не превышает 2 дБ.

Для расчета коэффициента редукции поля пространственного заряда плоского пучка в пространстве взаимодействия использовалась модель бесконечно широкого плоского электронного пучка толщиной h , находящегося между двумя идеально проводящими поверхностями, расстояние между которыми равно $2a$). Формула для коэффициента редукции имеет вид (κ - поперечное волновое число):

$$\Gamma_{\varrho} = 1 - \frac{2 \operatorname{sh}(\kappa h / 2) \operatorname{ch}(\kappa(a - h / 2))}{\kappa h \operatorname{ch}(\kappa a)}.$$

Расчет взаимодействия электронного пучка с волной ЗС проводился с использованием уравнений одномерной линейной и нелинейной теорий ЛБВ [8]. На рис.3 (а, б) представлены результаты расчета коэффициента усиления в режиме малого сигнала в зависимости от частоты (а) и напряжения пучка (б) при следующих параметрах: длина пространства взаимодействия 25мм (50 периодов), ток пучка 100 мА. Расчет проводился с помощью программы [9]. При напряжении 20 кВ максимальный коэффициент усиления в 12дБ достигается на частоте 185 ГГц, это значение близко к нижней частоте отсечки рабочего типа волны. Расчет проводился по одноволновой теории (учитывалось взаимодействие только с (+1)-ой пространственной гармоникой прямой волны в системе). При повышении напряжения пучок входит в синхронизм с (-1)-ой пространственной гармоникой на частотах, близких к нижней частоте отсечки. Однако учет этого взаимодействия в двухволновом приближении приводит лишь к незначительному изменению коэффициента усиления в области частот, лежащих ниже 180 ГГц. Пунктирные кривые на рис. 2а соответствуют данным, полученным методом последовательных приближений [10] по формуле:

$$E(L) = E_0 \exp(-i\beta_e L) \left(\left(1 - (2\pi CN)^3 F(\Phi_0, \varphi_q) \right) \right),$$

$$F(\Phi_0, \varphi_q) = -\frac{i}{\Phi_0^2 - \varphi_q^2} - \frac{\exp(-i(\Phi_0 - \varphi_q)) - 1}{2\varphi_q(\Phi_0 - \varphi_q)^2} + \frac{\exp(-i(\Phi_0 + \varphi_q)) - 1}{2\varphi_q(\Phi_0 + \varphi_q)^2},$$

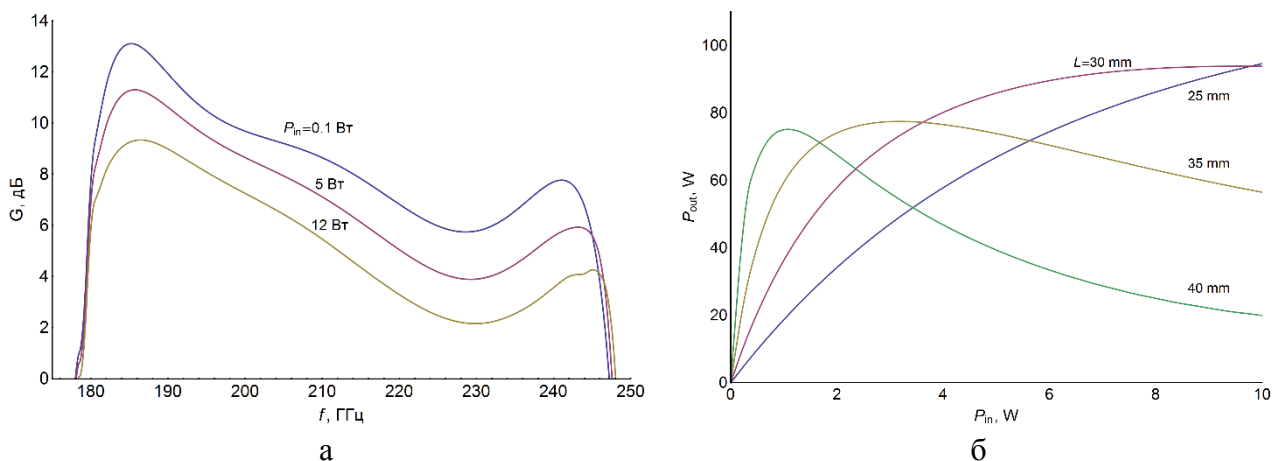


Рисунок 4. Частотная (а) и амплитудная (б) характеристики ЛБВ в нелинейном режиме

где $E(L)$ - электрическое поле на конце системы, $\Phi_0 = (\beta_e - \beta_0)L$ - относительный угол пролета, $C = (I_0 K / 4V_0)^{1/3} (\beta_0 / \beta_e)^{2/3}$ - модифицированный параметр усиления Пирса, $\varphi_q = \beta_q L$ - плазменный угол пролета, $\beta_q = \omega_q / v_e$ - редуцированное плазменное волновое число, $N = \beta_e L / (2\pi)$ - электронная длина лампы, $\beta_e = \omega / v_e$ - электронное волновое число, K - сопротивление связи, усредненное по сечению пучка. Из сравнения сплошных и пунктирных кривых видно, что при выбранных значениях параметров системы приближенный метод дает очень хорошие результаты при расчете коэффициента усиления уже в первом приближении.

Моделирование усиления в нелинейном режиме проводилось с помощью 1D варианта программы [11]. Результаты этих расчетов приведены в виде частотных зависимостей коэффициента усиления при различных мощностях входного сигнала (рис. 4а), и в виде зависимостей выходной мощности от входной при различных длинах пространства взаимодействия (рис. 4б). Амплитудные характеристики рассчитывались для частоты сигнала $f = 185$ ГГц, что соответствует абсолютному максимуму частотной характеристики (см. рис. 3а). Входная мощность $P_{in} = 0.1$ Вт отвечает линейному режиму работы прибора. При увеличении входной мощности форма зависимости $G(f)$ сохраняется, но величина коэффициента усиления уменьшается примерно на 2 и 4 дБ для $P_{in} = 5$ и 12 Вт.

Как видно из рисунка 4б, длина пространства взаимодействия $L = 25$ мм (50 периодов) слишком мала для достижения режима насыщения при разумных значениях входной мощности. При длине системы 35 мм (70 периодов) входная мощность, отвечающая режиму насыщения, равна 2.5 Вт, а при длине 40 мм (80 периодов) – 1 Вт. Выходная мощность при этом будет равна примерно 75 Вт. В целом результаты моделирования показывают, что в исследуемой ЛБВ достижимы величины коэффициента усиления порядка 8-12 дБ и выходные мощности порядка 70-90 Вт на частоте 185 ГГц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №13-08-00986 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. 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.
3. 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.
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. T.A. Karetnikova, A.G. Rozhnev, N.M. Ryskin, 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. N.M. Ryskin, A.G. Rozhnev, T.A. Karetnikova, 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. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Сов. радио, 1988.
8. Цейтлин М.Б., Кац А.М. Лампа с бегущей волной: Вопросы теории и расчета. М.: Сов. радио, 1964.
9. Каретникова Т.А. Линейная теория многосекционных широкополосных ЛБВ с неоднородной спиральной замедляющей системой. Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика, т. 20, № 6, 2012. С.148-159.
10. Шевчик В.Н., Трубецков Д.И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Сов. радио, 1970.
11. 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.