

**Т.А. Каретникова, А.Г. Рожнёв, Н.М. Рыскин**

ФГБОУ ВПО Саратовский государственный  
университет имени Н.Г. Чернышевского

## **Моделирование электродинамических характеристик замедляющей системы ЛБВ субмиллиметрового диапазона типа гребенка в волноводе с помощью метода интегрального уравнения**

*В докладе предложен новый метод точного и быстрого расчета электродинамических параметров замедляющей системы ЛБВ и ЛОВ миллиметрового диапазона в виде одиночной и двойной гребенки в прямоугольном волноводе. Метод дает результаты, совпадающие с результатами расчета по трехмерной конечноэлементной программе Comsol, и работает более чем на порядок быстрее. Приведены результаты расчета ЗС для проектируемого ЛБВ-усилителя в диапазоне 0.2 ТГц.*

**Ключевые слова:** лампа бегущей волны, плоский пучок, источники терагерцового диапазона, метод интегрального уравнения, метод Галеркина

В последние годы в области сверхвысокочастотной электроники особый интерес привлекает проблема освоения терагерцового (субмиллиметрового) диапазона. Исследования в этом направлении широко ведутся в США, Китае, Индии, Южной Корее, странах Европы. Различными научными коллективами были предложены миниатюрные аналоги классических приборов вакуумной электроники: ламп бегущей и обратной волны, отражательных клистронов, приборов со скрещенными полями и др. При создании подобных приборов естественным выглядит переход к пространственно развитым электродинамическим системам, которые позволяют использовать электронные пучки большой площади с реализуемыми значениями плотности тока. В частности, перспективными представляются приборы с ленточным электронным пучком и замедляющими системами (ЗС) типа плоской гребенки.

Известно значительное количество различных методик для расчета ЗС с гребенками [1,2], однако большинство из них использует те или иные приближения, что не позволяет получать данные об электродинамических параметрах системы с необходимой точностью. Расчет с использованием трехмерных электродинамических программ, основанных на методе конечных элементов или конечных разностей, требует значительных машинных ресурсов и большого времени моделирования.

В настоящем докладе приводятся описание точного и быстрого электродинамического метода расчета, а также результаты численного моделирования электродинамических параметров ЗС типа одиночной и сдвоенной гребенки в прямоугольном волноводе для усилителя диапазона 0.2 ТГц с выходной мощностью порядка 10 Вт.

### **Методика численного расчета**

Рассмотрим сдвоенную гребенку, нанесенную на широкие стенки прямоугольного волновода (см. рисунок 1). Предполагается, что в общем случае гребенка является несиммет-

ричной, то есть зубцы в верхней и нижней ее части имеют различную высоту и толщину, но период обеих решеток одинаков, и равен  $d$ . Сдвиг нижней гребенки относительно верхней равен  $w$ . Для использования в качестве ЗС в электронных устройствах, наибольший интерес представляют системы, у которых обе гребенки идентичны, и сдвиг равен  $w=0$  или  $w=d/2$ , однако предлагаемая методика развита для общего случая, который может быть полезен при исследовании влияния неидентичности решетки на ее электродинамические свойства. В направлении  $y$  система ограничена плоскостями  $y=0$  и  $y=b$ , в которых находятся узкие стенки волновода.

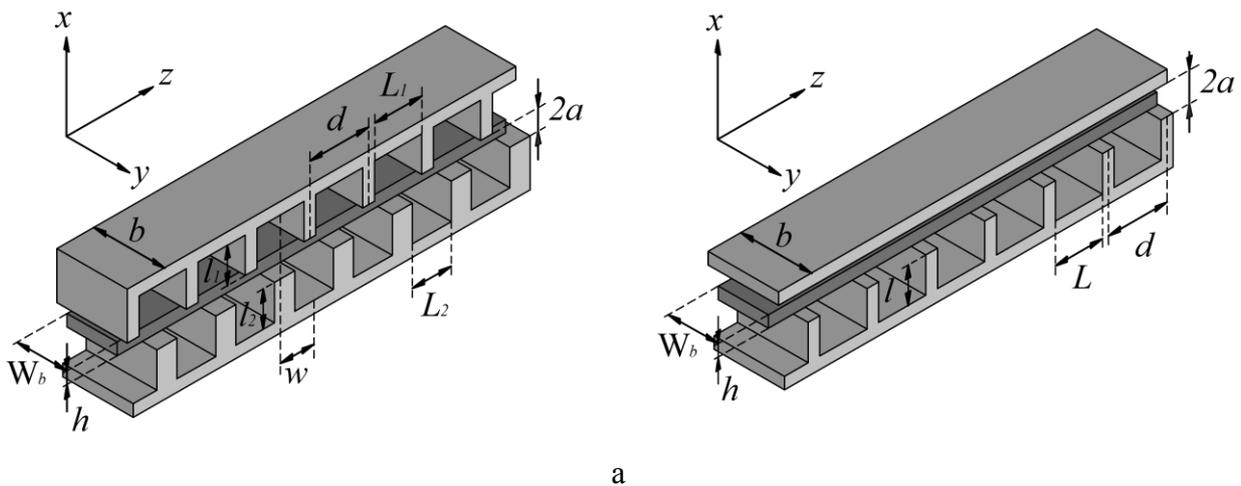


Рис. 1. Геометрия сдвоенной гребенки (а) и одиночной гребенки (б)

Для расчета электродинамических параметров замедляющей системы использовался метод интегрального уравнения. В пролетном канале компоненты поля представлялись в виде разложения по пространственным гармоникам периодической структуры, что обеспечивает выполнение периодических граничных условий Флоке. В областях между штырями гребенки поля записывались в виде разложения по мембранным функциям, которые удовлетворяют необходимым граничным условиям на металлических поверхностях, ограничивающих эту область. Интегральное уравнение получается путем сшивания полей на границах между областью взаимодействия (пролетным каналом) и областями между штырями гребенки (резонаторами). Для изучаемой структуры эти условия позволяют получить систему двух связанных интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода относительно  $E_z$ -компонент поля, определенных на соответствующих границах между пролетным каналом и верхними и нижними резонаторами.

Для численного решения полученной системы интегральных уравнений использовался метод Галеркина с учетом сингулярного поведения поля на ребрах штырей гребенки [3]. Метод позволяет сформулировать алгебраическую систему уравнений относительно коэффициентов разложения функций, описывающих распределение продольных компонент электрического поля на границах между различными областями, по системе ортогональных полиномов. Условие равенства нулю детерминанта системы задает дисперсионное уравнение

для собственных волн в периодической структуре. В случае одиночной гребенки аналогичный алгоритм приводит к одному интегральному уравнению вместо двух.

На основе развитого алгоритма разработана программа, реализованная в системе компьютерной математики «Wolfram Mathematica». В программе предусмотрен расчет дисперсии и распределения полей собственных типов волн для заданных значений геометрических параметров системы частоты. Кроме этого, в программе рассчитывается сопротивление связи Пирса, усредненное по сечению прямоугольного пучка, симметрично расположенного в пространстве взаимодействия системы.

Были проведены тестовые расчеты для ЗС в виде гребенки, сдвинутой на половину периода, параметры которой взяты из работы [4]: период системы  $d = 460$  мкм, ширина резонатора  $L = 345$  мкм, высота штырей  $l = 270$  мкм, высота пролетного канала  $2a = 150$  мкм, ширина волновода  $b = 770$  мкм, сечение пучка  $700 \times 100$  мкм<sup>2</sup>. На рис. 2 приведены соответствующие диаграмма Бриллюэна в основной зоне и зависимость сопротивления связи +1 пространственной гармоники от частоты. Точками показаны результаты расчетов по программе COMSOL-4.1, сплошными линиями — по методу интегрального уравнения. Тестовые расчеты показали полное совпадение получаемых с использованием данной программы результатов с результатами расчетов по программе COMSOL, при том, что время расчета уменьшается в 50-100 раз (в зависимости от близости расчетной точки к границам полос пропускания замедляющей системы).

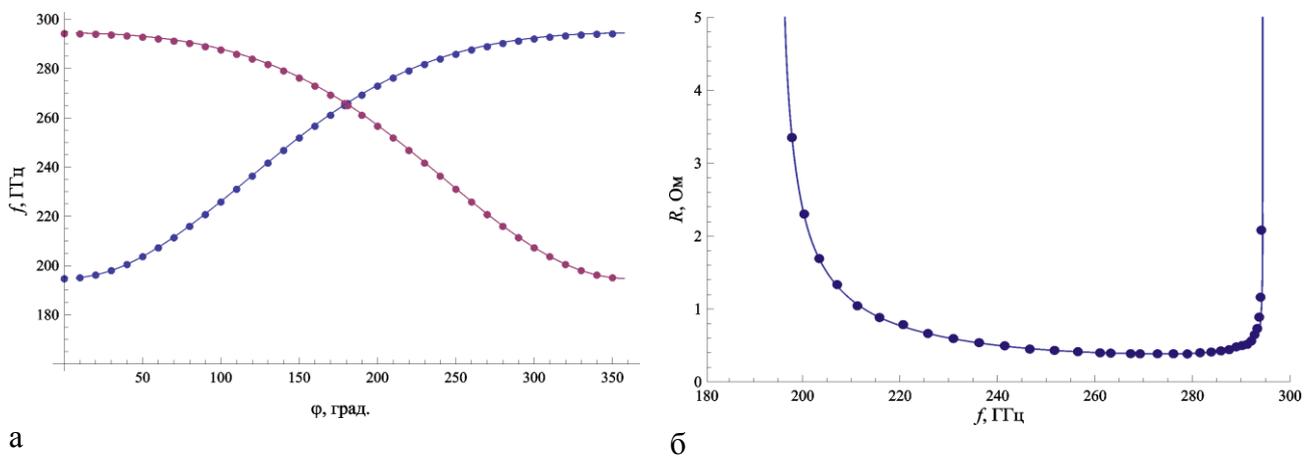


Рис. 2. Диаграмма Бриллюэна (а) и зависимость сопротивления связи от частоты (б) для ЗС, параметры которой взяты из работы [4]. Кружки — расчет по COMSOL 4.1, сплошная линия — по методу интегрального уравнения.

### Результаты расчетов для ЗС ЛБВ диапазона 0.2 ТГц

В настоящем разделе приведены результаты расчетов, направленных на получение оптимальных электродинамических параметров для ЛБВ миллиметрового диапазона (рабочая частота  $f = 190$  ГГц). Проведенные расчеты показали, что для увеличения сопротивления связи необходимо обеспечить достаточно однородное распределение поля в поперечном сечении пучка. Зависимость напряженности поля синхронной гармоники от вертикальной координаты  $x$  описывается функцией  $\text{ch}(\gamma_1 x)$ , где  $\gamma_1$  — поперечная постоянная распростра-

нения +1 пространственной гармоники, а зависимость от поперечной координаты  $y$  — функцией  $\sin(\pi y/b)$ . Таким образом, для достижения значений сопротивления связи порядка 1 Ом необходимо, чтобы фактор  $\gamma_1 a$  (где  $a$  есть вертикальный размер канала), характеризующий провисание поля, был не слишком большим,  $\gamma_1 a \leq 2$ . Как показали расчеты, высота канала должна быть не более 200 мкм.

На рис. 3 приведены результаты расчетов: диаграмма Бриллюэна, зависимости напряжения синхронизма, фактора  $\gamma_1 a$  и сопротивления связи (усредненного по поперечному сечению пучка) от частоты при различных значениях периода ЗС  $d = 440, 450$  и  $460$  мкм. Толщина ламели  $s = d - L = 150$  мкм, высота  $l = 150$  мкм. Ширина волновода  $b = 850$  мкм. Ширина пучка на 100 мкм меньше ширины волновода, т.е. равна 750 мкм. Частота отсечки при таком значении  $b$  составляет 175 ГГц.

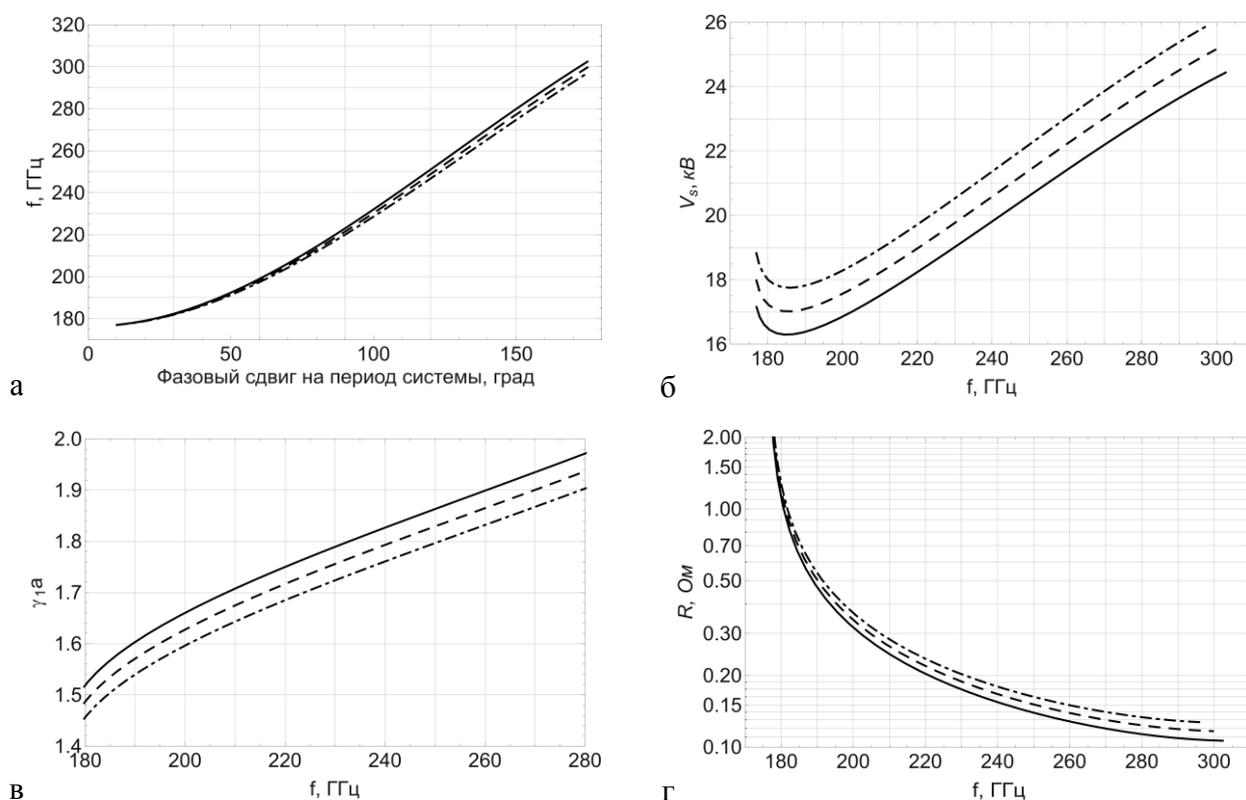


Рис. 3. Диаграмма Бриллюэна (а), напряжение синхронизма (б), фактор  $\gamma_1 a$  (в) и сопротивление связи (г) для следующих параметров:  $b = 850$  мкм,  $l = 150$  мкм,  $2a = 200$  мкм,  $d = 440$  мкм (сплошные линии), 450 мкм (пунктир), 460 мкм (штрих-пунктир).

Изменение периода оказывает влияние в основном на дисперсию. С ростом периода напряжение синхронизма возрастает, сопротивление связи также возрастает незначительно.

Для ЗС в виде симметрично расположенных одинаковых гребенок,  $E_x$  - компонента поля основной моды имеет нуль в плоскости симметрии системы. Для лучшего взаимодействия необходимо смещать электронный пучок в сторону одной из гребенок. В этом случае предпочтительно использовать ЗС, состоящую из одной гребенки и металлической стенки.

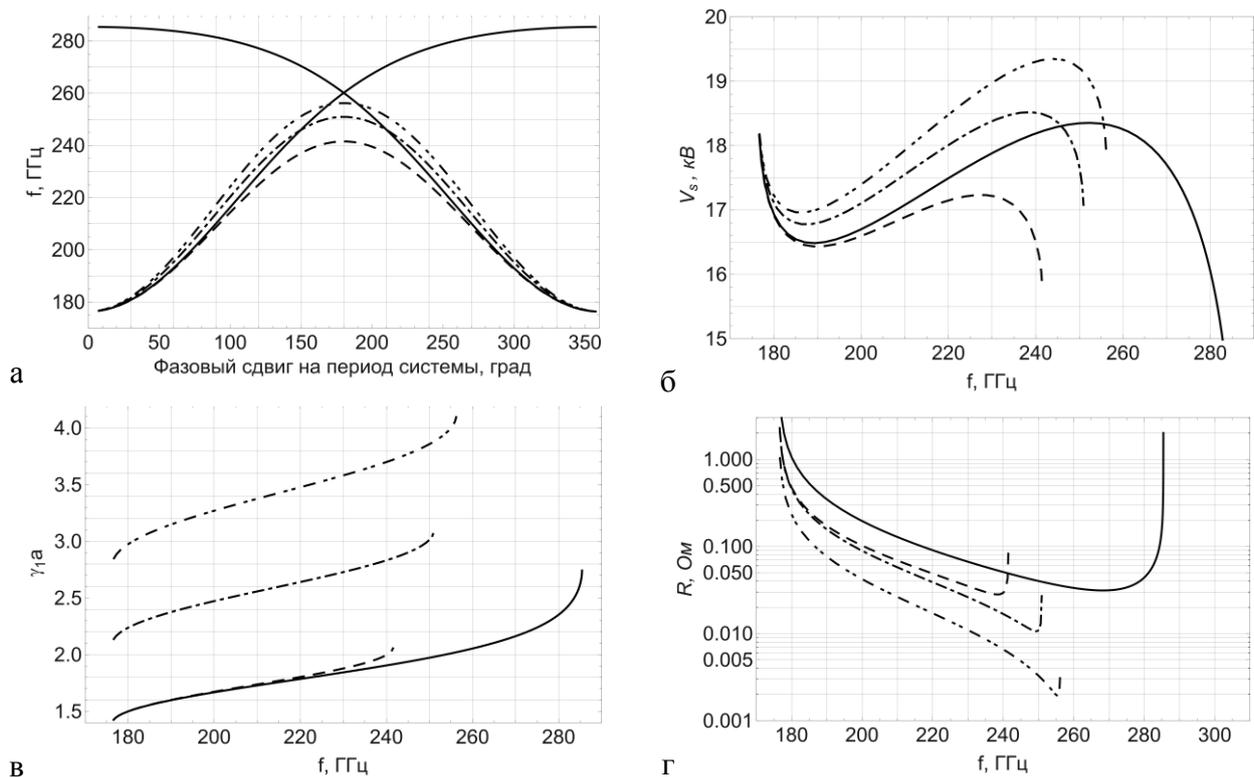


Рис. 4. Диаграмма Бриллюэна (а), напряжение синхронизма (б), фактор  $\gamma_1 a$  (в) и сопротивление связи (г) при  $s = 200$  мкм,  $L = 450$  мкм,  $l = 250$  мкм и различных значениях высоты пролетного канала:  $2a = 200$  мкм (пунктир), 300 мкм (штрих-пунктир), 400 мкм (двойной штрих-пунктир) — одиночная гребенка и 400 мкм (сплошные линии) — сдвоенная гребенка. Толщина пучка составляет 75% от высоты пролетного канала

Как видно из графика зависимости усредненного по сечению пучка сопротивления связи от частоты (рис. 4г), сопротивление связи для сдвоенной гребенки (сплошная линия) больше, чем для системы гребенка – зеркало (пунктирные линии). Для системы одиночная гребенка – зеркало при увеличении высоты пролетного канала усредненное по сечению пучка сопротивление связи заметно уменьшается. Главным образом, это происходит потому, что амплитуда поля синхронной гармоники почти экспоненциально убывает по мере удаления от гребенки, обращаясь в нуль на зеркале. В результате, при увеличении высоты канала все меньшая часть электронного пучка эффективно взаимодействует с электрическим полем.

*Работа поддержана грантами РФФИ № 11-02-01280 и 13-08-00986.*

#### Библиографический список

1. Альтшулер Ю.Г., Татаренко А.С. Лампы малой мощности с обратной волной. М.: Сов. радио, 1963.
2. Freund H. P., Abu-Elfadl T. M. Linearized Field Theory of a Smith–Purcell Traveling Wave Tube // IEEE Trans. on Plasma Science, 2004. V. 32. № 3. P. 1015-1027.
3. Заргано Г.Ф., Ляпин В.П., Михалевский В.С., Синельников Ю.М., Синявский Г.П., Чекрыгина И.М. Волноводы сложных сечений. М.: Радио и связь. 1986.

4. Shin, Y.-M., A. Baig , L.R. Barnett, et al. Modeling investigation of an ultrawideband terahertz sheet beam traveling-wave tube amplifier circuit// IEEE Trans. Electron Devices, 2011. V. 58. № 9. P. 3213-3219.