

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Нестационарная дискретная модель
лампы бегущей волны с замедляющей
системой типа «петляющий волновод»**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 215 группы направления 03.04.01 «Прикладные математика
и физика» факультета нелинейных процессов

Терентюка Артема Георгиевича

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

Н.М. Рыскин

Зав. кафедрой нелинейной физики

д.ф.-м.н., профессор

Н.М. Рыскин

Саратов 2016 г.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых проблем современной физики является освоение терагерцевого (ТГц) диапазона частот [1-3]. Источники когерентного излучения ТГц диапазона будут иметь широкие перспективы применения в таких областях, как безопасность и противодействие терроризму (поиск и обнаружение взрывчатых веществ), информационно-коммуникационные системы, радиоастрономия, спектроскопия, медицина. Это обусловлено рядом фундаментальных особенностей ТГц-излучения: в данном диапазоне лежат колебательные и вращательные спектры многих веществ; широкий диапазон частот привлекателен для систем передачи информации; ТГц излучение обладает высокой проникающей способностью и позволяет получать контрастное изображение, но в то же время обладает гораздо меньшим ионизирующим воздействием, чем рентгеновское излучение. Однако ТГц диапазон на сегодняшний день является наиболее слабо освоенным участком электромагнитного спектра, в нем затруднена работа как радиоэлектронных, так и оптических приборов. Поэтому разработка относительно мощных источников когерентного ТГц излучения будет иметь огромное значение. Наиболее высокие мощности потенциально способны обеспечить гиротроны и лазеры на свободных электронах, однако они являются громоздкими и дорогостоящими. Такой уровень мощности могут обеспечить только приборы вакуумной электроники (ЛОВ, ЛБВ, клистроны и др.) [3,4].

Основным инструментом теоретического анализа подобных приборов является численное моделирование. В настоящее время этого существуют мощные универсальные программные средства, такие как, MAGIC, CST STUDIO и др., в которых электродинамическая часть задачи решается при помощи непосредственного интегрирования уравнений Максвелла с заданными граничными условиями. Однако применение упомянутых пакетов программ является трудоемкой задачей, требующей больших затрат машинного времени и значительных вычислительных ресурсов. Поэтому, по-

прежнему актуальна разработка программ численного моделирования, основанных на использовании различных вариантов теории возбуждения электродинамических структур электронными пучками. Данные программы служат мощным средством моделирования на начальном этапе проектирования новых приборов и модернизации уже разработанных, где на первый план выходят простота построения модели и высокая скорость расчетов.

Одним из перспективных вариантов теории возбуждения периодических замедляющих систем (ЗС) является нестационарная дискретная теория, предложенная С.П. Кузнецовым [5]. Фактически в рамках такой теории ЗС представляется в виде ансамбля связанных между собой электромагнитных осцилляторов. Однако эти осцилляторы, вообще говоря, не тождественны отдельным элементам периодической структуры (как в методах эквивалентных схем), и связь осуществляется не только между ближайшими соседями. Достоинствами метода оказывается отсутствие ограничений на вид и ширину спектра моделируемого процесса, возможность моделировать процессы электронно-волнового взаимодействия, как в центре, так и на границе полосы пропускания, а также за ее пределами. В то же время, он оказывается существенно более быстрым и экономичным, чем «полностью электромагнитные» коды, основанные на прямом численном решении уравнений Максвелла. В особенности эти преимущества должны проявиться при решении задач об усилении сигналов со сложной цифровой модуляцией, применяемых в современных телекоммуникационных системах, которые пока не поддаются решению с помощью «полностью электромагнитных» кодов.

На основе нестационарной дискретной теории сотрудниками СГУ были реализованы программы компьютерного моделирования приборов типа ЛБВ с цепочками связанных резонаторов (ЦСР) [6,7]. Впоследствии этот подход был развит применительно к широкополосным спиральным ЛБВ в работах

научной группы из университета Aix-Marseille и компании Thales Electron Devices (Франция) [8-11].

Однако, несмотря на все достоинства нестационарной дискретной теории возбуждения, примеры ее успешного использования остаются единичными. Использование аппарата дискретной теории для моделирования широкополосных ЗС затрудняется тем, что для адекватной аппроксимации дисперсионной характеристики требуется учитывать связь каждого осциллятора с большим количеством ближайших соседей (например, для спиральной ЛБВ — по 20 с каждой стороны [8-11]). Одной из наиболее перспективных для усилителей и генераторов ТГц диапазона считается ЗС типа петляющего волновода. Эта структура является достаточно широкополосной (10-30 %), хотя и не в такой степени, как спираль. Другими важнейшими достоинствами данного типа ЗС также являются относительная простота изготовления, высокая теплорассеивающая способность и механическая прочность, относительно высокое сопротивление связи. Таким образом, актуальной задачей является дальнейшее развитие дискретной теории возбуждения и ее применение для моделирования приборов ТГц диапазона, в частности, ЛБВ с петляющим волноводом.

Целью магистерской работы является развитие модифицированной дискретной теории возбуждения, пригодной для моделирования замедляющих систем с умеренной шириной полосы пропускания (20-30%), и ее применение для моделирования ЛБВ с ЗС типа «петляющий волновод» ТГц диапазона.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Построение модифицированной версии дискретной теории возбуждения замедляющих систем, обеспечивающей удовлетворительную точность аппроксимации дисперсионной характеристики учете минимального числа связей между осцилляторами.

- Расчет холодных характеристик ЗС типа «петляющий волновод» с помощью «полностью электромагнитного» трехмерного кода и определение параметров дискретной модели на основе полученных результатов.
- Разработка программы моделирования замедляющей системы на основе модифицированной дискретной теории. Расчет холодных характеристик и коэффициента прохождения.
- Разработка методики расчета коэффициента усиления в режиме малого сигнала. Расчет коэффициента усиления в различных режимах (синхронизм в центре полосы пропускания и вблизи ее границ).

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые построена модифицированная дискретная теория возбуждения замедляющих систем, позволяющая существенно сократить количество учитываемых связей между осцилляторами по сравнению с известными аналогами. На ее основе развита линейная теория, позволяющая проводить оперативный компьютерный расчет коэффициент усиления ЛБВ, в том числе, при взаимодействии в окрестности границы полосы пропускания и за ее пределами. Разработана программа компьютерного моделирования нестационарного распространения сигнала в ЗС, проведены расчеты для ЛБВ с петляющим волноводом диапазона 0.22 ТГц.

Научная значимость работы обусловлена тем, что разработанные методики и программы компьютерного моделирования могут быть использованы при проектировании ЛБВ и ЛОВ ТГц-диапазона петляющим волноводом, а также с ЗС других типов, например, с плоской гребенкой. Подобные приборы представляют интерес для различных приложений, прежде всего, в системах беспроводной связи нового поколения [12].

Работа состоит из трех глав. В главе 1 приводится обзор работ, посвященных ЛБВ терагерцевого диапазона с замедляющей системой типа «петляющий волновод», описаны их преимущества, способы изготовления и моделирования. В главе 2 описаны основные уравнения дискретной теории

возбуждения и ее модифицированная версия. В главе 3 приведены результаты численного моделирования при помощи программы, основанной на модифицированной теории, и проведено ее сравнение с результатами, полученным из полностью электромагнитного кода.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Работа состоит из трех глав. В главе 1 приводится обзор работ, посвященных ЛБВ терагерцевого диапазона с замедляющей системой типа «петляющий волновод», описаны их преимущества, способы изготовления и моделирования.

Как уже отмечалось во Введении, источники средней мощности (порядка 10–100 Вт) терагерцевого диапазона на основе электровакуумных приборов представляют интерес для многочисленных приложений, таких как высокоскоростная передача данных, радиолокация с высоким разрешением, биологическая и химическая спектроскопия, а также биомедицинская диагностика [1-3]. Лампы бегущей волны с ЗС в виде петляющего волновода (ПВ) являются одними из наиболее перспективных приборов терагерцевого диапазона.

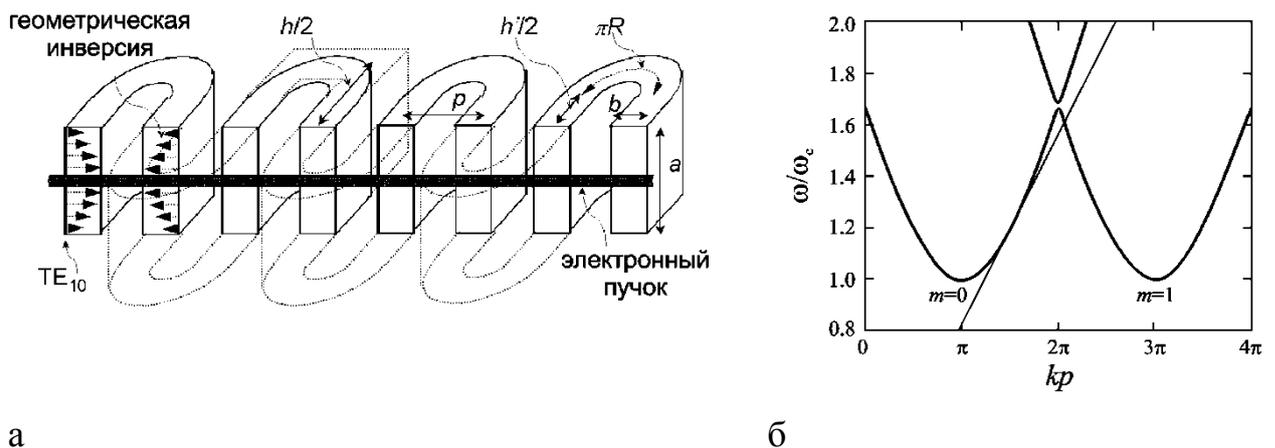


Рис. 1. Схема ЗС типа «петляющий волновод» (а) и ее дисперсионная характеристика (б).

Схематическое изображение ЗС типа петляющий волновод приведено на рис. 1а. Такие замедляющие системы обладают значительными преимуществами. К ним можно отнести относительную простоту изготовления, по сравнению с такими распространёнными замедляющими системами, как спираль и ЦСР. Существуют различные способы изготовления ПВ: технология LIGA, технология получения объёмных микродеталей методами рентгенолитографии, гальваностегии и формовки; глубокое реактивное ионное травление; микрофрезерование [4]. К другим преимуществам относят механическую и тепловую прочность в связи с цельнометаллической структурой, достаточно широкую полосу усиления ($\sim 20\%$), высокое сопротивление связи и относительно малые потери в миллиметровом диапазоне.

В главе 2 описаны основные уравнения дискретной теории возбуждения и ее модифицированная версия. Традиционная формулировка нестационарного дискретного уравнения возбуждения [5,7] имеет вид

$$\dot{C}_{sn} - i \sum_{m=-\infty}^{\infty} \Omega_{sm} C_{sn-m} = -\frac{1}{2N_s} \int_V \mathbf{j} \mathbf{E}_{sn}^* dV. \quad (1)$$

Оно использует представление периодической структуры в виде последовательности связанных ячеек (осцилляторов). Здесь C_{sn} — комплексные амплитуды колебаний s -той моды в n -ной ячейке, Ω_{sn} — коэффициенты связи n -ной и $n \pm m$ -ой ячеек, \mathbf{E}_{sn} — собственные функции, задающие распределение поля в n -ной ячейке, \mathbf{j} — плотность тока.

Электрическое и магнитное поля \mathbf{E} и \mathbf{H} выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \sum_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{sn}(t) \mathbf{E}_{s0}(x-nd, y, z) - \nabla \Phi, \\ \mathbf{H} &= i \sum_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{sn}(t) \mathbf{H}_{s0}(x-nd, y, z). \end{aligned} \quad (2)$$

Основным недостатком приведенного выше варианта дискретной теории является необходимость учета связей каждого осциллятора с большим количеством соседей для адекватной аппроксимации дисперсионной характеристики. Например, при моделировании спиральной ЛБВ [8-10] потребовалось учитывать по 20 ближайших соседей с каждой стороны. Отметим, что коэффициенты связи Ω_{sn} представляют собой коэффициенты Фурье-разложения периодической дисперсионной характеристики $\Omega_s(\varphi)$, $\varphi = \beta p$, p — пространственный период. Представляется, что более быстрой сходимости аппроксимации дисперсионной характеристики рядом Фурье можно достичь, если аппроксимировать функцию $\Omega_s^2(\varphi)$, а не $\Omega_s(\varphi)$. Соответственно, в таком случае можно будет учитывать меньшее число членов в уравнении (1).

В итоге были получены уравнения для комплексных амплитуд A_{sn} , B_{sn}

$$\ddot{A}_{sn} + \sum_m \Theta_{sm} A_{s,n-m} = -\frac{1}{N_s} \frac{d}{dt} \int_V \mathbf{j} \mathbf{E}_{sn}^* dV, \quad (3)$$

$$\ddot{B}_{sn} + \sum_m \Theta_{sm} B_{s,n-m} = -\frac{i}{N_s} \int_V \mathbf{j} \left(\sum_m \Omega_{sm} \mathbf{E}_{s,n-m}^* \right) dV. \quad (4)$$

Электрическое и магнитное поля \mathbf{E} и \mathbf{H} выражаются через них следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \sum_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{sn}(t) \mathbf{E}_{s0}(x-np, y, z) - \nabla \varphi, \\ \mathbf{H} &= \sum_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_{sn}(t) \mathbf{H}_{s0}(x-np, y, z). \end{aligned} \quad (5)$$

Разработана методика быстрого расчета коэффициента линейного усиления, основанная на методе последовательных приближений [14]. Методика позволяет проводить расчет усиления сигнала во всей полосе пропускания, на границе, и за пределами полосы. На рис. 2 показана зависимость коэффициента усиления от частоты при напряжении 17 кВ, что

соответствует синхронизму в центре полосы пропускания. Система состоит из 50 периодов. Ток пучка равен 50 мА.

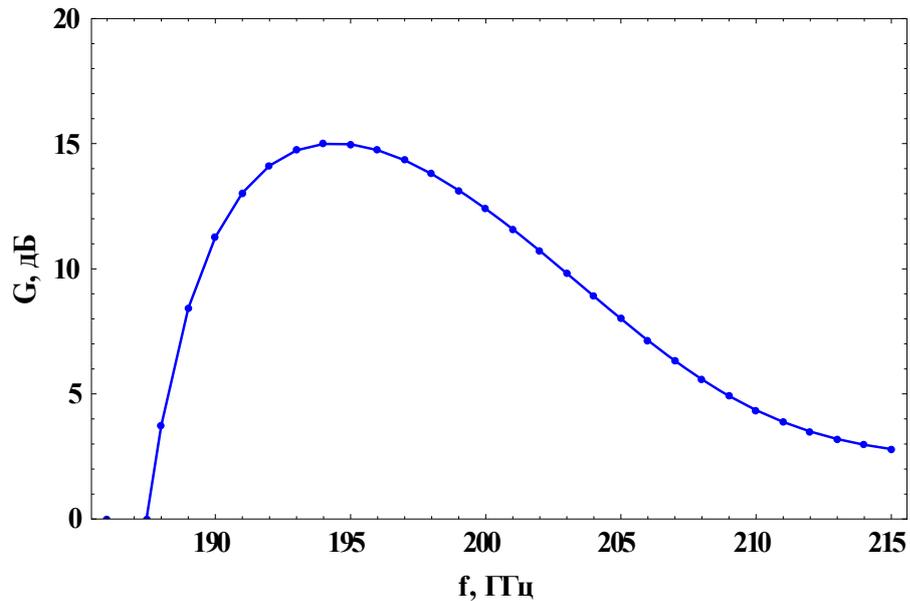


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления от частоты.

В главе 3 приведены результаты численного моделирования при помощи программы, основанной на модифицированной теории, и проведено ее сравнение с результатами, полученным из полностью электромагнитного кода. Для определения параметров дискретной модели были рассчитаны холодные характеристики ЗС с помощью пакета ANSYS HFSS. На рис. 3 представлено изображение одного периода ЗС. Размеры ЗС были взяты из статьи [13], где исследовалась ЛБВ с рабочей частотой 220 ГГц. Размеры приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Размеры ЗС типа петляющий волновод

Поперечный размер, a	852 μm
Продольная толщина стенки, b	120 μm
Период структуры, p	280 μm
Высота прямой части, h	270 μm
Радиус канала пучка, r	140 μm

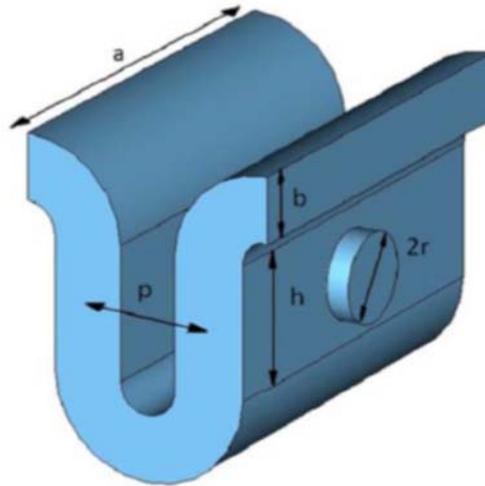


Рис. 3. Схематическое изображение одного периода замедляющей системы.

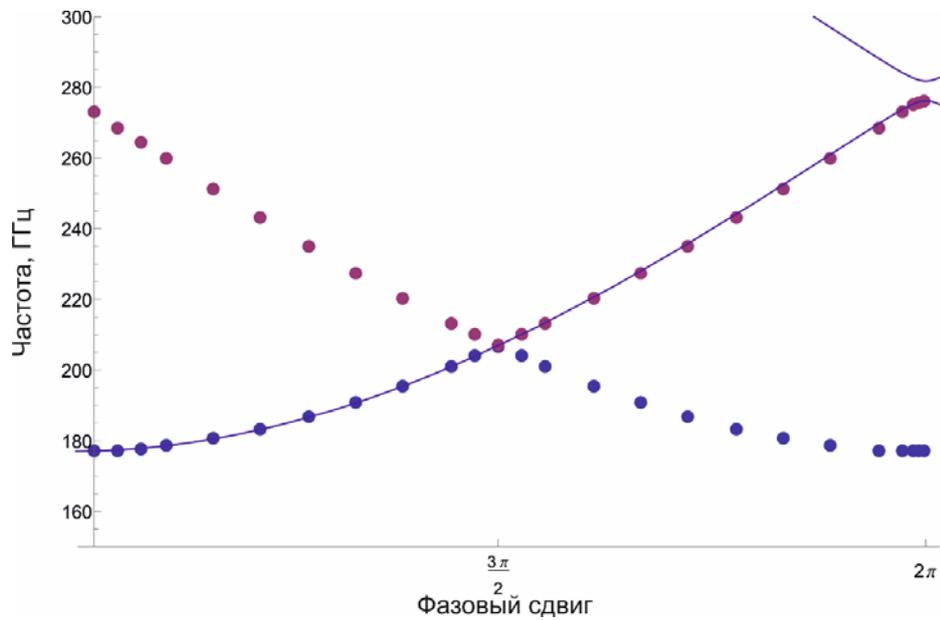


Рис. 4. Дисперсионная характеристика ЗС с петляющим волноводом диапазона 220 ГГц (кружки) и ее аппроксимация формулой (6) (сплошная линия).

На рис. 4 представлена дисперсионная характеристика системы и ее аппроксимация вида

$$(\omega - \omega_s)^2 = \delta^2 + [(\omega_c - \omega_s)^2 - \delta^2] \sin^2(\varphi/2), \quad (6)$$

где $\omega_c/2\pi = 176.96$ ГГц, $\omega_s/2\pi = 276.14$ ГГц, $\delta = 0.01\omega_s$. Следовательно, достаточно учитывать связь только с ближайшими двумя соседями, что значительно облегчает компьютерное моделирование. Если же применять традиционную форму дискретной теории (1), каждый осциллятор должен быть связан с десятью соседями с обеих сторон.

Для компьютерного моделирования была разработана программа в среде Delphi 7, реализующая решение уравнения возбуждения «холодной» структуры. Результаты расчетов приведены на рис. 5. Они хорошо согласуются с теоретической зависимостью, построенной по формуле (6).

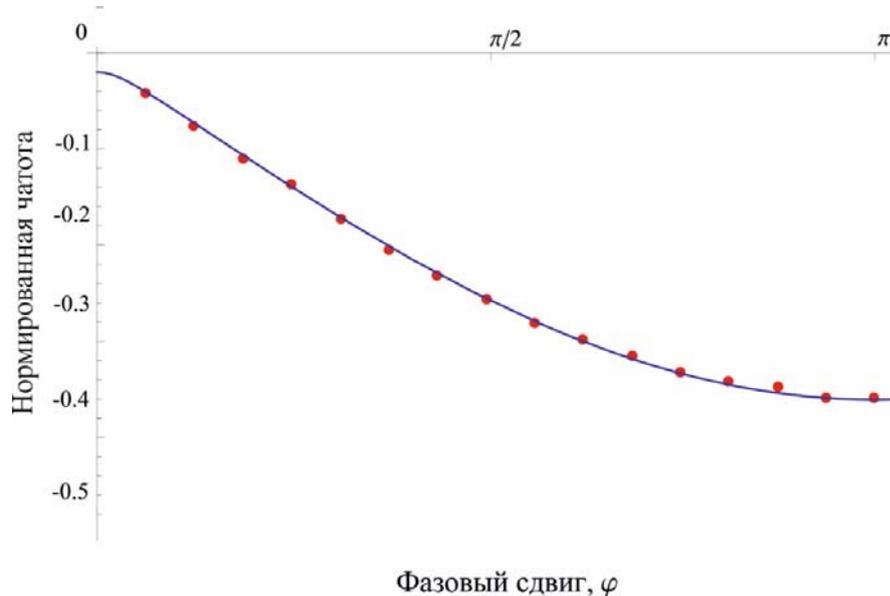


Рис. 5. Дисперсионная характеристика закороченного на концах отрезка ЗС из 16 периодов. Кружки — результаты численного моделирования, сплошная кривая — теоретическая зависимость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской работы были получены следующие основные результаты.

1. Развита модифицированная дискретная теория возбуждения замедляющих систем, позволяющая значительно упростить моделирование ЗС по сравнению с оригинальной версией. В частности, адекватное описание дисперсионной характеристики в предложенной модели возможно при учете связи каждого элементарного осциллятора только с ближайшими соседями, тогда как в оригинальной версии для ЗС с полосой пропускания порядка 20-30% требуется учитывать связь не менее чем с 10 соседями с каждой стороны.

2. Проведены расчеты холодных электродинамических параметров замедляющей системы типа петляющий волновод диапазона 220 ГГц. Исходя из результатов моделирования, определены параметры дискретной модели (верхняя и нижняя граничные частоты, волновое сопротивление, распределение ВЧ поля в зазоре).

3. Развита и реализована в виде компьютерной программы простая методика расчета усиления в режиме малого сигнала, основанная на методе последовательных приближений. Методика позволяет проводить расчет усиления сигнала во всей полосе пропускания, на границе, и за пределами полосы.

4. На основе модифицированной дискретной теории возбуждения создана программа компьютерного моделирования распространения сигнала в ЗС типа петляющий волновод. Рассчитана дисперсионная характеристика, хорошо согласующаяся с теоретической, а также коэффициент прохождения в структуре, согласованной на выходном конце.

В качестве дальнейшего развития данной работы предполагается разработка программы моделирования взаимодействия электронного пучка с полем ЗС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Siegel P.H. Terahertz technology // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2002. Vol. 50. P. 910–928.
2. Linfield E. Terahertz applications: a source of fresh hope. // Nat. Photonics. 2007. Vol. 1. P 257–258.
3. Booske J.H. Plasma physics and related challenges of millimeter-wave-to-terahertz and high power microwave generation // Phys. Plasmas. 2008. Vol. 15, 055502.
4. Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.S., Park J.H., Temkin R.J. Vacuum electronic high power terahertz sources // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. Vol. 1. No. 1. P. 54-75.
5. Кузнецов С.П. Об одной форме уравнений возбуждения периодического волновода // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. С. 419-421.
6. Ryskin N.M., Titov V.N. Nonstationary simulation of electron beam interaction with coupled resonant cavities // 2007 IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference. Digest of Technical Papers. P. 1185-1190.
7. Ryskin N.M., Titov V.N., Yakovlev A.V. Nonstationary nonlinear discrete model of a coupled-cavity traveling-wave-tube amplifier // IEEE Trans. Electron Devices. 2009. Vol. 56, No. 5. P. 928-934.
8. Bernardi P., Andre F., David J.-F., Le Clair A., Doveil F. Efficient time domain simulation of a helix traveling-wave tube. // IEEE Trans. Electron Devices. 2011. Vol. 58. No. 6. P. 1761–1767.
9. Bernardi P., Andre F., Bariou D., David J.-F., Le Clair A., Doveil, F. Efficient 2.5-D non-stationary simulations of a helix TWT // 2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). P. 307-308.
10. Bernardi P., Andre F., David J.-F., Le Clair A., Doveil F. Control of the reflections at the terminations of a slow wave structure in the nonstationary discrete theory of excitation of a periodic waveguide // IEEE Trans. Electron Devices. 2012. Vol. 58. No. 11. P. 4093-4097.

11. André F., Théveny S., Doveil F., Elskens Y. First comparison of new TWT discrete model with existing models // Abstracts, 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Beijing, China.
12. Paoloni C., Letizia R., André F., et al. W-band TWTs for new generation high capacity wireless networks // 17th International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2016), Monterey, USA, April 2016.
13. Zheng R., Ohlckers P., Chen X. Particle-in-cell simulation and optimization for a 220-GHz folded-waveguide traveling-wave tube // IEEE Trans. Electron Dev. 2011. Vol. 58. No. 7. P. 2164-2171.
14. Шевчик В.Н. Основы электроники сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1959.