

Отзыв официального оппонента, кандидата физико-математических наук, с.н.с., ведущего научного сотрудника Ильиной Елены Моисеевны на диссертационную работу Каретниковой Татьяны Андреевны «Особенности распространения электромагнитных волн в замедляющих системах типа плоских гребенок и их взаимодействия с ленточным электронным потоком в терагерцевом диапазоне частот», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиофизика и 01.04.04 - Физическая электроника

Развитие современной науки и техники СВЧ неразрывно связано с освоением миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн и с необходимостью постоянного совершенствования приборов и устройств этих диапазонов. Ввиду того что эти устройства относятся к числу наиболее важных элементов СВЧ-приборов, применяемых в системах наземной и космической связи, в радиолокации, измерительной технике, без их совершенствования невозможно создание новых поколений радиоэлектронной аппаратуры. Поскольку при создании таких приборов и устройств резко уменьшаются размеры пролетного канала для пропускания электронного пучка, то для получения выходной мощности ~ 80-100 Вт приходится применять пространственно-развитые замедляющие системы, в частности – одиночные и сдвоенные гребенки, и ленточные электронные потоки в них. Немаловажную роль при этом играет исследование электродинамических характеристик таких замедляющих систем и условий взаимодействия ленточных электронных потоков с электромагнитными полями таких систем. Поэтому тема диссертации Каретниковой Т.А., посвященной изучению структуры электромагнитных полей в замедляющих системах типа плоских гребенок и условий взаимодействия с ними ленточных электронных потоков является **актуальной**.

Диссертация, содержащая 144 страницы машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемых источников, включающего 130 наименований, в том числе 31 – по опубликованным работам диссертантки, 25 из которых являются основными публикациями по теме диссертации.

Во введении кратко обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы её цель, научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание глав

диссертации. В нем имеется несколько ссылок на зарубежные источники, а более подробный анализ опубликованной по исследуемой проблеме литературы содержится в соответствующих главах диссертации.

В первой главе дается обзор современного состояния изучаемой проблемы со ссылками на зарубежные и имеющиеся немногочисленные отечественные источники. Отмечается, что ТГц-диапазон является, вплоть до настоящего времени, наименее освоенным участком электромагнитного спектра, обеспечить получение мощности в десятки и сотни ватт в котором можно только с помощью электровакуумных приборов. Наибольшие перспективы среди этих приборов имеют лампы бегущей волны (ЛБВ). Для получения таких мощностей в них целесообразно применять гребенчатые замедляющие структуры и ленточные электронные пучки. Рассматриваются различные технологии изготовления таких замедляющих систем (ЗС), оцениваются преимущества и недостатки каждой из них. Отмечается, что компьютерное моделирование таких ЗС проводилось, до последнего времени, с помощью 3D пакетов, требующих чрезвычайно больших затрат машинного времени. В связи с вышесказанным делается правомерный вывод о том, что теоретический анализ приборов подобного класса и разработка более быстродействующих компьютерных моделей его практической реализации представляют, несомненно, большой научный и практический интерес.

Во второй главе предложен и реализован оригинальный подход к расчету электродинамических характеристик ЗС типа плоских гребенок, предназначенных для приборов О-типа субтерагерцевого диапазона частот. Он основан на методе интегрального уравнения, отличаясь оперативностью, высокой точностью и быстродействием. Особенностью развитой методики является корректный учет сингулярности полей на ребрах гребенки, что позволяет значительно повысить точность решения при небольшом количестве слагаемых в рядах и обеспечить единственность решения. Предложена методика учета затухания в периодической структуре, основанная на теории возмущений и являющаяся обобщением подхода, применяемого для расчета затухания в гладком волноводе. На основе изложенной в этой главе методики разработана программа компьютерного моделирования, позволяющая рассчитывать замедление, сопротивление связи и затухание, в том числе для затухающих и комплексных мод. Результаты расчетов по ней согласуются с данными, полученными посредством 3D программных пакетов, в частности HFSS, не уступая им по точности решения и превосходя их по быстродействию в 50-100 раз.

В третьей главе на основе методики, разработанной во второй главе, проведены расчеты электродинамических характеристик ЗС в виде двойной гребенки, помещенной в прямоугольный волновод. Исследовано влияние основных геометрических параметров ЗС на замедление, сопротивление связи, напряжение синхронизма электромагнитной волны с электронным пучком. Согласно проведенным диссертанткой исследованиям, оптимальной для применения в ЛБВ-усилителе оказалась система, гребенки в которой сдвинуты на половину периода. Проведены расчеты затухания в ЗС с учетом шероховатости поверхности её и приведены значения затухания волны.

В четвертой главе с применением аппарата матриц передачи разработана методика расчета линейного режима работы многосекционных ЛБВ с учетом встречного излучения. Представлен алгоритм расчета, позволяющий учитывать отражения волны как от неоднородностей в ЗС, как и от концов системы. Проведены расчеты коэффициента усиления в линейном режиме, результаты которых сопоставлены с расчетными данными, полученными по известным 3D-моделям. Максимальное расхождение результатов не превышает 1...2 дБ, что при коэффициенте усиления ~20 дБ является допустимой погрешностью.

В пятой главе рассчитывается коэффициент усиления 20-киловольтной ЛБВ 0.2-ТГц диапазона с ЗС типа сдвоенной гребенки со сдвигом гребенок на полпериода. Расчет проводится с учетом прямой и встречной волн по программе, созданной диссертанткой и описанной в главе 4. Напряжение пучка варьируется в пределах 19-21 кВ. Усиление наблюдается в полосе частот шириной 70 ГГц, ширина полосы усиления на уровне -3 дБ составляет ~20 ГГц. Проведенный в этой же главе расчет амплитудно-частотных и амплитудных характеристик показал, что в исследуемой ЛБВ достижимы значения коэффициента усиления в нелинейном режиме ~8-12 дБ и выходные мощности ~70-90 Вт на частоте 185 ГГц.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

Наиболее значимыми научными и практическими результатами диссертации являются:

- Разработка методов, алгоритмов и программ расчета электродинамических характеристик замедляющих систем типа сдвоенной гребенки.
- Корректный учет сингулярности полей на ребрах гребенки, что обеспечивает единственность решения и повышает его точность при небольшом количестве слагаемых в рядах.

- Исследование влияния основных геометрических параметров ЗС на замедление, сопротивление связи и затухание. Нахождение оптимальной геометрии ЗС – сдвига гребенок на полпериода и оптимальных значений высоты и толщины штырей, ширины пролетного канала.

- Применение аппарата матриц передачи для расчета линейных режимов работы многосекционного ЛБВ-усилителя. Разработка на основе данного аппарата алгоритма и программы моделирования этих режимов в компьютерной среде Mathematica.

- Проектирование на основе созданной программы ЛБВ-усилителя диапазона 0.2 ТГц с ленточным электронным пучком и ЗС типа сдвоенной гребенки, обеспечивающего усиление в линейном режиме 20-25 дБ и выходную мощность в режиме насыщения 80-100 Вт.

Выявленные Каретниковой Т.А. новые научные закономерности, присущие распространению электромагнитных волн в замедляющих системах типа плоских гребенок и взаимодействию с ними ленточных электронных пучков в ТГц диапазоне сформулированы ею в виде положений, выносимых на защиту.

Достоверность результатов и выводов диссертации вытекает из научной обоснованности выдвинутых принципов построения новых математических моделей и программ компьютерного моделирования процессов распространения электромагнитных волн в замедляющих системах типа плоских гребенок при прохождении в них и взаимодействии с ними ленточных пучков, а также из сопоставления результатов расчета по созданным моделям с данными расчетов, проведенных по 3D-моделям и программам расчета нелинейного режима работы ЛБВ.

Практическая ценность диссертации состоит в том, что предложенные и реализованные новые оперативные методы компьютерного моделирования процессов прохождения электромагнитных волн через указанные системы нашли свое воплощение в разработках таких предприятий, как АО НПП «Алмаз», СФ ИРЭ РАН и послужат этим и другим федеральным предприятиям в будущем.

К числу недостатков работы можно отнести следующее.

В диссертации фигурирует термин «оптимизированная» геометрия ЗС, который предполагает оптимизацию, а как проводилась она – с помощью программного блока или каким-либо иным способом – не указано.

Неясно, как отыскивается при расчетах оптимальная величина выходной мощности в режиме насыщения. Лучше было бы отыскивать путем

применения соответствующего программного блока максимальную величину КПД.

На с. 83 указывается, что с ростом периода ЗС сопротивление связи возрастает, однако при этом увеличивается рабочее напряжение, что может оказаться нежелательным. Наверное, оптимизацию геометрии ЗС следовало бы проводить при заданном электрическом режиме, который определяется исходя из требований к прибору по выходной мощности.

На с. 83 говорится о возникновении полосы непропускания в ЗС при изменении относительного положения гребенок. Следует отметить, что аналогичное явление наблюдалось на спиральной ЛБВ с периодическим изменением шага спирали в средней секции и описано в патенте РФ № 2353016 Рафаловича А.Д. и Данилова А.Б, опубл. 20.04.2009, бюл. № 11, а также в материалах конференции АПЭП-2012, с. 23-25.

На с. 89 приводится формула для коэффициента уменьшения плазменной частоты со ссылкой на книгу: Шевчик В.Н., Шведов Г.Н., Соболева А.В. «Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах», изд-во СГУ, 1962. Но эта формула была получена ранее Дж.Е. Роу (правда, без усреднения по пучку) и опубликована в Trans. IRE, 1956, v. ED-3, № 1, а позднее - в Сб. переводных статей «Лампа бегущей волны» под ред. В.Т. Овчарова, изд-во Госэнергоиздат, 1959, с. 48, на что следовало бы сослаться.

К достоинствам работы следует отнести её внутренне единство, широту охвата решаемой проблемы. Диссертация написана грамотно, оформлена в соответствии с ГОСТ'ом.

Все основные результаты диссертации опубликованы соискателем в научной печати, докладывались, обсуждались на международных конференциях и семинарах и имеют широкую научную известность.

Достоверность основных выводов диссертации подтверждается результатами расчетов по более строгим математическим моделям, требующим на один-два порядка больших компьютерных ресурсов и временных затрат.

Вышеприведенный перечень исследований, проведенных автором, свидетельствует о том, что их тематика соответствует паспортам специальностей 01.04.03 – Радиофизика и 01.04.04 – Физическая электроника, по которым она представлена к защите.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и достаточно полно её характеризует.

Учитывая большую научную и практическую значимость диссертации, являющейся научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи об исследовании структуры полей электромагнитных волн в ЗС типа плоских гребенок и взаимодействия с ними ленточных пучков в терагерцевом диапазоне частот, имеющей несомненное значение для развития знаний в области радиофизики и физической электроники, считаю, что диссертация полностью удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, Каретникова Татьяна Андреевна, безусловно, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник,
кандидат физ.-мат. наук, с.н.с.

Ильина

Ильина Е.М.

Подпись Ильиной Е.М. заверяю:

Зам. директора, д.т.н., заслуженный
деятель науки РФ, профессор



Кудряшов

Кудряшов В.П.

14.11.2016 г.