

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Хе Ши "Рассеяние электромагнитных волн на уединенных и периодических волноводных неоднородностях", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – "радиофизика".

В диссертационной работе Хе Ши рассмотрено взаимодействие различных волн круглого и прямоугольного волноводов с периодическими и одиночными включениями.

**Актуальность темы диссертации.** Создание мощных электровакуумных приборов в миллиметровом диапазоне длин волн является актуальной задачей. Диафрагмированный волновод применяется в качестве замедляющей системы ЛБВ. Резонаторы в виде отрезков диафрагмированных волноводов используются в клистродах с распределенным взаимодействием, где кроме большой выходной мощности требуется и сравнительно широкая полоса рабочих частот. Круглый металлический диафрагмированный волновод применяется также в линейных ускорителях электронов и в сепараторах частиц высоких энергий. Для линейных ускорителей характерна уникальная эффективность процесса ускорения электронов для получения мощного потока ионизирующего излучения. Высокочастотный сепаратор является, по-видимому, единственным устройством, позволяющим разделять частицы сверхвысоких энергий.

Другое направление исследований диафрагмированных волноводов связано с разработкой эффективных облучателей зеркальных антенн, которые позволяют независимо управлять шириной луча и уровнем кроссполяризации излучения антенн. Подобные волноводы, как облучатели антенн, обладают рядом ценных свойств. Они позволяют сформировать аксиально-симметричные диаграммы направленности с хорошими поляризационными характеристиками и низким уровнем боковых лепестков. Следовательно, диафрагмированные волноводы можно рассматривать как перспективный тип облучателей антенн.

Таким образом, исследование электродинамических свойств круглых диафрагмированных волноводов, проведенное в диссертационной работе Хе Ши, и построение адекватных моделей для изучения качественных и количественных характеристик волн в таких волноводах представляет большой научный и практический интерес.

Различного рода идеально проводящие включения, которые помещают в волноводы и различные устройства на их основе, используются в радиофизике для оптимизации волноводных трактов. В частности, в технике СВЧ они используются для улучшения электродинамических характеристик разветвителей, делителей мощности, умножителей, фильтров. Теоретический метод исследований здесь играет решающую роль.

Автором проведено исследование взаимодействия электромагнитных волн с пространственно неоднородными периодическими или с одиночными идеально проводящими и анизотропными включениями в волноводах и волноводных трактах с целью анализа влияния анизотропии и неоднородности материала на закономерности распространения и рассеяния электромагнитных волн. Решение задач электродинамики с учетом анизотропных качеств вещества является достаточно сложным. На сегодняшний день разработано большое количество методов исследования структур, которым свойственна анизотропия, однако существует много задач, связанных с взаимодействием электромагнитного поля с анизотропной средой, которые через свою сложность и громоздкость к этому времени остались вне поля зрения других исследователей. В диссертационной работе Хе Ши предложено обобщение существующих методов, что

делает возможным их применение к ситуациям, которые не рассматривались ранее (впервые рассмотрена ситуация когда анизотропному включению присуща смешанная анизотропия). На их основе получен ряд новых практически важных результатов, а также созданы эффективные быстродействующие алгоритмы для расчета на ЭВМ существенных характеристик поля.

Автором диссертации также рассмотрено поглощение и рассеяние СВЧ излучения очень тонкими металлическими проволочками. Получено строгое аналитическое решение и проведены числовые расчеты для большого диапазона значений отношения диаметра цилиндра к длине волны излучения. Выяснено, что при взаимодействии электромагнитной волны с очень тонким металлическим цилиндром наблюдается неизвестный ранее эффект аномально большого поглощения излучения. Этот эффект был исследован в рассматриваемой работе.

Важность исследования указанных выше проблем обусловлена как их чисто научной ценностью, так и большим значением для прикладных применений. Это позволяет считать тему проведенного соискателем исследования актуальной, как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Диссертация выполнена в рамках научных программ исследований, проводимых на кафедре теоретической радиофизики Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, что является еще одним свидетельством актуальности выбранной темы диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, выводов и одного приложения. Список использованных источников насчитывает 146 наименований отечественных и зарубежных авторов, а собственные результаты опубликованы в 7-х статьях, опубликованных в ведущих профессиональных журналах и 3-х тезисах докладов на украинских и международных конференциях.

Во введении к диссертации проанализировано современное состояние вопроса, обоснована актуальность темы, определены цель и задачи работы, представлены аннотации новых результатов, полученных соискателем ученой степени, а также проанализировано практическое значение полученных результатов.

Раздел 1 является вводным и содержит обзор литературы, в котором очерчены основные результаты, полученные другими авторами по проблематике диссертации. Выявлен круг задач и методы их решения, которые подлежат рассмотрению в последующих главах предлагаемой диссертационной работы.

Раздел 2 посвящен решению задачи на собственные значения в диафрагмированном волноводе, который представлен дисперсионными зависимостями на диаграмме Бриллюэна. Для решения этой задачи применен известный метод частных областей с продольным разделением. Проанализировано влияние изменения геометрических параметров структуры на указанные развязки, исследована трансформация собственных мод каждого из типов волн диафрагмированного волновода. В разделе выяснены и проанализированы характерные особенности поведения аксиально-симметричных и аксиально-несимметричных волн.

В разделе 3 построены решения для двух волноводных электродинамических задач. Рассмотрена задача о возбуждении анизотропного неоднородного включения в прямоугольном волноводе, которому присуща смешанная анизотропия. Проанализировано рассеяние электромагнитных волн на идеально проводящем включении в Т-образном соединении двух прямоугольных волноводов. Благодаря большой практической значимости, а также отсутствию полных решений таких задач их рассмотрение является актуальным.

В разделе 4 рассмотрено поглощение и рассеяние СВЧ излучения тонкими металлическими проволочками. Исследован эффект аномально сильного рассеяния и поглощения излучения тонкими проволочками в свободном пространстве и в волноводе. Взаимодействие электромагнитной волны с такими цилиндрическими включениями характеризуется в работе безразмерными факторами: эффективностью рассеяния; эффективностью поглощения и эффективностью ослабления. Проведено измерение ослабления и отражения волны в волноводе тонкими металлическими проволочками.

**Научная новизна результатов**, полученных автором работы, заключается в следующем:

1. Впервые проведено строгое комплексное исследование режима собственных волн в круглом металлическом волноводе, периодически нагруженном металлическими дисками с отверстиями в центре. Исследована трансформация собственных типов волн диафрагмированного волновода при изменении его геометрических параметров.
2. Математически строго решена задача на собственные значения в периодическом диафрагмированном круглом волноводе. Результаты расчета представлены дисперсионными зависимостями на диаграммах Бриллюэна для  $H_{0i}$ - и  $E_{0i}$ -волн при произвольных геометрических размерах структуры.
3. В работе впервые предложен алгоритм по определению коэффициентов матрицы рассеяния от произвольной диэлектрической волноводной вставки со смешанной анизотропией, помещенной в прямоугольный волновод. Показано, что анизотропия материала вставки существенно влияет на распространение электромагнитных волн в прямоугольном волноводе.
4. Решена задача рассеяния электромагнитных волн на металлическом включении произвольного поперечного сечения в Т-образном сочленении прямоугольных волноводов с помощью теоремы Грина. Это позволило определить всеволновую матрицу рассеяния для произвольного количества волноводных мод.
5. Впервые проанализировано взаимодействие электромагнитных волн в волноводе с очень тонкими проволочками. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических исследований.

В процессе проведения исследований Хе Ши установлены основные физические свойства и закономерности, имеющие место при взаимодействии различных волноводных волн с периодическими и одиночными включениями. Полученные автором результаты могут быть полезны при создании приборов и устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.

**Достоверность полученных результатов и выводов** не вызывает сомнений. Задачи рассматриваются в строгой электродинамической постановке с оправданными допущениями. Используемые методы исследований хорошо апробированы и являются физически обоснованными. Исследования электродинамических структур, рассматриваемых в диссертационной работе, осуществляются в рамках широко используемых в электродинамике идеализаций (бесконечность структуры, идеальная проводимость и др.) и с учетом известных ограничений этих идеализаций. Модели адекватно описывают физические процессы, происходящие в таких электродинамических объектах. Результаты, полученные автором, находятся в соответствии с данными, приведенными другими авторами. В пользу достоверности полученных результатов говорят проведенные экспериментальные исследования. Полученные при этом результаты находятся в хорошем соответствии с теоретическими данными.

**Научная и практическая значимость** диссертационной работы состоит в разработке физических основ для создания приборов и устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн на базе рассмотренного автором взаимодействия различных волноводных волн с периодическими и одиночными включениями. Полученные результаты при решении задачи по исследованию режима собственных волн периодического диафрагмированного круглого волновода могут быть использованы при разработке ЛБВ миллиметрового диапазона, облучателей зеркальных антенн, позволяющих эффективно управлять диаграммой направленности.

Результаты, изложенные в диссертационной работе Хе Ши, представляют интерес для специалистов в области радиофизики, дифракционной и твердотельной электроники и могут быть использованы при разработке источников излучения, поляризационных фильтров, облучателей зеркальных антенн. Результаты, полученные в диссертации, можно рекомендовать для использования, как в научных, так и в научно-производственных учреждениях, а также на радиофизических факультетах университетов.

В диссертационной работе Хе Ши имеются **некоторые недостатки**.

1. При анализе взаимодействия  $TE_{0i}$  волн в круглом волноводе автор говорит о периодической дисперсии. Хотя здесь правильнее было бы сказать о междупиковом взаимодействии волн. Тем более, что рассматриваемые волны относятся к одному классу симметрии, а в качестве элемента, приводящего к такому результату, выступает периодическая неоднородность в волноводе (рис. 2.2б, стр. 31). Аналогичный результат наблюдается при взаимодействии в таком же волноводе  $TM_{0i}$  волн (рис. 2.7а, стр. 40).
2. На графиках 2.2÷2.6 не приведены обозначения осей координат. В этом же разделе автор приводит абсолютные значения размеров круглого волновода и периодических включений в него, не указывая их размерность.
3. В работе при исследовании силовых линий электромагнитного поля в анизотропном включении волновода широко используется метод конечных разностей, однако ничего не говорится о его сходимости.
4. В диссертации отсутствует описание ряда графиков. Так из текста совершенно непонятно, что обозначают кривые красного цвета, приведенные на рис. 4.11 и 4.12 (стр. 119).
5. В работе имеют место некоторые стилистические неточности, например, отсутствуют пробелы между словами на стр. 74 и 75, в тексте энергетический коэффициент отражения обозначен как  $|G|^2$  (стр. 116), а на рис. 4.15 (стр. 117) – как  $|\Gamma|^2$ .

Вместе с тем, отмеченные замечания и недостатки не затрагивают принципиальных положений и выводов диссертации, не нарушают ее суть и не влияют на общую положительную оценку проведенных в работе исследований.

Диссертационная работа Хе Ши написана логично и аргументировано, оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к кандидатским диссертациям. Материалы работы прошли необходимую апробацию на конференциях и семинарах. Ее основные результаты опубликованы в 7 статьях в ведущих специализированных изданиях и в 3 тезисах докладов на научных конференциях.

Автореферат в полном объеме отражает основные положения и содержание диссертации. Работа написана в общепринятом в научной литературе стиле.

**Выводы по работе.** Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу в области радиофизики. В работе на современном научном уровне решен ряд новых задач по взаимодействию различных волноводных волн круглого и прямоугольного волноводов с периодическими и одиночными включениями.

Разработанные алгоритмы и результаты теоретических исследований имеют практическое значение для конструирования целого ряда приборов и устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Полученные физические результаты являются новыми и хорошо обоснованными.

Учитывая приведенные выше аргументы, считаю, что по своему научному уровню, актуальности, новизне, практической значимости полученных результатов диссертационная работа "Рассеяние электромагнитных волн на уединенных и периодических волноводных неоднородностях" удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Хе Ши, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Официальный оппонент  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
ведущий научный сотрудник  
отдела теории дифракции и  
дифракционной электроники  
ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины,



И. К. Кузьмичев

Подпись д. ф.-м. н., в.н.с. И.К. Кузьмичева удостоверяю.  
Ученый секретарь ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины,  
кандидат физ.-мат. наук

И.Е. Почанина