

УТВЕРЖДАЮ:

Зам. Декана физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова



Профессор

Федянин А. А.

2016 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,  
физического факультета

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Исследование процессов нестационарного отражения электромагнитных импульсов от слоистых структур» выполнена Трофимовым Алексеем Викторовичем на кафедре фотоники и физики микроволн физического факультета. В период подготовки диссертации соискатель Трофимов Алексей Викторович являлся аспирантом кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

В 2012 году А.В. Трофимов окончил физический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по специальности «физика».

В 2016 году А.В. Трофимов окончил очную аспирантуру физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по специальности 01.04.03 – «Радиофизика» под научным руководством доктора физико-математических наук А.В. Козаря, профессора кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2016 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

По итогам обсуждения представленной диссертации принято следующее **заключение:**

Диссертационная работа «Исследование процессов нестационарного отражения электромагнитных импульсов от слоистых структур» является законченным научным исследованием, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и соответствует специальности 01.04.03 – радиофизика.

**Целью диссертационной работы** является проведение детальных теоретических и экспериментальных исследований явления нестационарного отражения коротких и сверхкоротких электромагнитных импульсов от многослойных интерференционных структур (МИС), включая анализ влияния сильной волноводной дисперсии, неоднородностей и потерь в многослойной структуре, на процесс формирования отраженного сигнала. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи:**

1. Разработка экспериментальных методов и средств исследования процесса нестационарного отражения коротких и сверхкоротких электромагнитных импульсов от многослойных интерференционных структур в диапазоне СВЧ.
2. Поиск и анализ методов усиления интенсивности импульсного сигнала, сформированного в результате нестационарного отражения коротких электромагнитных импульсов от многослойных интерференционных структур.
3. Теоретическое и экспериментальное исследование явления нестационарного отражения в согласующих структурах с сильной волноводной дисперсией.
4. Развитие в отношении учета потерь и дисперсии в слоях МИС аналитических методов решения уравнений Максвелла в применении к задачам расчета взаимодействия импульсных сигналов с многослойными структурами.
5. Теоретическое и экспериментальное исследование явления нестационарного отражения в многослойных интерференционных структурах с максимально плоской амплитудно-частотной характеристикой.

**Основные результаты**, полученные в работе, состоят в следующем:

1. Впервые получены результаты экспериментального наблюдения явления нестационарного отражения амплитудно-модулированного сигнала от многослойной интерференционной структуры в СВЧ-диапазоне.

2. Обнаружено что, наличие даже малых потерь в слоях многослойной интерференционной структуры существенно влияет на процесс нестационарного отражения.

3. Показана возможность усиления интенсивности импульсов, сформированных в процессе нестационарного отражения за счет эффекта волноводной дисперсии.

4. Решена задача согласования высокоотражающей нагрузки с волноводом за счет сильной волноводной дисперсии. Показана возможность обеспечения полной локализации энергии падающей волны в нагрузке с практически любым коэффициентом отражения с помощью согласующей структуры, состоящей всего из одного слоя, толщина которого близка к четвертьволновой.

5. Показано что, при отражении амплитудно-модулированного сигнала от полуволнового слоя с потерями всегда существует момент времени, когда, при ненулевой амплитуде падающего сигнала, амплитуда отраженного сигнала стремится к нулю, а его фаза изменяется на  $\pi$ .

6. При наличии малых потерь в слоях многослойной структуры амплитудный коэффициент отражения линейно зависит от величины потерь, в то время как формирование фазовой картины интерферирующих волн происходит в этом случае так же, как и в отсутствие потерь.

7. Определяющим фактором, влияющим на характер процесса нестационарного отражения короткого электромагнитного импульса от многослойной структуры, является функциональная зависимость коэффициента отражения многослойной структуры от частоты в окрестности несущей частоты падающего импульса. Так как разные многослойные структуры могут иметь одинаковые коэффициенты отражения в некотором интервале частот, то короткие электромагнитные импульсы, отраженные от разных структур, будут совпадать с высокой точностью.

8. При малых потерях в слоях структуры с максимально плоской амплитудно-частотной характеристикой огибающая отраженного сигнала может быть приближенно описана  $N$ -производной от огибающей падающего сигнала.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Усовершенствована теория нестационарного отражения импульсных сигналов от многослойных интерференционных структур. Существующий теоретический аппарат дополнен с учетом влияния на процесс нестационарного отражения потерь в слоях многослойной интерференционной структуры и сильной волноводной дисперсии.

2. Разработаны экспериментальные методы изучения процесса нестационарного отражения сверхкоротких электромагнитных импульсов от многослойных интерференционных структур в СВЧ-диапазоне. Впервые получены результаты экспериментального наблюдения явления нестационарного отражения амплитудно-модулированного сигнала от многослойной интерференционной структуры в СВЧ-диапазоне.
3. Обнаружено наличие более сложного процесса нестационарного отражения в многослойных структурах неотражающего класса с максимально плоской амплитудно-частотной характеристикой, по сравнению с многослойными структурами, имеющими другие функциональные зависимости амплитудно-частотной характеристики.

### **Практическая значимость результатов работы**

Теоретическая значимость работы состоит в усовершенствовании аналитического метода расчета амплитуды сигнала, сформировавшегося в результате нестационарного отражения, в отношении учета потерь в слоях МИС. Предложен новый метод измерения диэлектрических характеристик материалов, используемых для синтеза МИС в СВЧ-диапазоне. На основе выполненного теоретического анализа предложены методы усиления амплитуды импульсов, сформированных в процессе нестационарного отражения.

Выполненные исследования явления нестационарного отражения от многослойных интерференционных структур с максимально плоской амплитудно-частотной характеристикой позволили выявить неизвестные ранее закономерности при нестационарном отражении.

**Личный вклад автора:** все представленные в диссертации результаты получены автором лично или при его непосредственном и определяющем участии. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, при этом вклад диссертанта был определяющим.

**Достоверность результатов, представленных в диссертации,** обеспечивается адекватностью использованных физических моделей и математических методов, выбранных для решения поставленных задач, корректностью использованных приближений, а также соответствием результатов теоретических и численных расчетов и экспериментальных данных, и не вызывает сомнений. Теоретический анализ явления нестационарного отражения проводился на основе преобразования Фурье данных,

полученных методом импедансных характеристик, который вытекает из уравнений Максвелла для материальных сред. Широко использовались компьютерные методы расчета на основе общепризнанных алгоритмов численного решения уравнения Максвелла. В основе экспериментальных исследований лежат классические методы СВЧ-техники.

**Апробация результатов:** основные результаты докладывались лично автором на следующих российских и международных конференциях:

Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» / Звенигород., 2012; International Conference on Coherent and Nonlinear Optics ICONO/LAT / Moscow., 2013; Научной конференции «Ломоносовские чтения – 2013» / Москва., 2013; XIV Всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн» / Можайск., 2013; V Научно-технической конференции ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей» / Балашиха., 2014; XIV Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» / Можайск., 2014; XV Всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова / Можайск., 2015; IV Всероссийской научно-технической конференция «Электроника и Микроэлектроника СВЧ» / Санкт-Петербург., 2015.

Основные результаты представлены в 12 публикациях, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ведущих периодических изданий ВАК:

1. Козарь А.В., Трофимов А.В. Явление нестационарного отражения импульсных сигналов от слоистых структур с потерями. // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия, 5., 2013.
2. Козарь А.В., Трофимов А.В. Процесс нестационарного отражения электромагнитных импульсов в системе с сильной волноводной дисперсией. // Известия РАН. Серия физическая, 2. 80., 2016.
3. Козарь А.В., Трофимов А.В. Метод согласования высокоотражающих материалов за счет сильной волноводной дисперсии. // Успехи современной радиоэлектроники, 5., 2015.
4. Козарь А.В., Трофимов А.В. и др. Процесс нестационарного отражения коротких электромагнитных импульсов от многослойных фильтров с максимально плоской амплитудно-частотной характеристикой. // Журнал радиоэлектроники, 4, 2016.

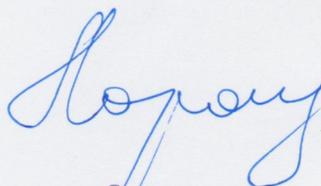
В написанных в соавторстве работах основные результаты, представленные в диссертации, получены лично А. В. Трофимовым

Диссертация «Исследование процессов нестационарного отражения электромагнитных импульсов от слоистых структур» Трофимова А.В. рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

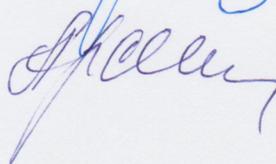
Заключение принято на заседании кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Присутствовало на заседании 23 чел. Результаты голосования: «за» - 23 чел., «против» - нет, «воздержались» - нет. Протокол №12 от «20» апреля 2016 г.

И.о. зав. кафедрой  
фотоники и физики микроволн,  
к.ф.-м.н., доцент

 А.Ф. Королев

Ученый секретарь кафедры  
фотоники и физики микроволн,  
д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник

 Т.И. Арсеньян