

Процесс нестационарного отражения электромагнитных импульсов в системе с сильной волноводной дисперсией

В работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование процесса нестационарного отражения электромагнитного импульса от согласованной с волноводом высокоотражающей нагрузки. Представлены как результаты теоретического моделирования методом конечных разностей во временной области, так и экспериментально полученные данные. Исследования проведены в диапазоне частот 8.5 ГГц до 12 ГГц.

Ключевые слова: интерференция, многослойные структуры, нестационарное отражение, согласующие структуры, волноводная дисперсия.

Достаточно часто в современной СВЧ технике возникают задачи согласования высокоотражающих нагрузок с волноведущей системой. Для решения данной задачи активно применяются многослойные интерференционные поглотители, так как они могут обеспечивать полное поглощение волновой энергии в поглощающих слоях [1]. Для полного поглощения энергии в нагрузке достаточно синтезировать первое многослойное зеркало с модулем коэффициента отражения, равным модулю коэффициента отражения от нагрузки, и с соответствующими фазами, отличающимися на величину, кратную π .

Однако, в случае сильноотражающих нагрузок, такое решение обладает очевидными недостатками. Поскольку нагрузка обладает высоким коэффициентом отражения, первое зеркало должно иметь весьма высокий коэффициент отражения, т.е. должно содержать большое число слоев, что приводит к появлению заметного нежелательного поглощения падающей волны в зеркале. Кроме того, большое число слоев ведет к большим геометрическим размерам зеркала, что в ряде случаев делает такой способ решения проблемы согласования неприемлемым (например, работа в условиях низких и сверхнизких температур, где требуется минимально возможная теплоемкость системы в целом).

Этих недостатков лишен метод, основанный на использовании дисперсионных свойств волноведущей линии. Применение данного метода способно обеспечить полное поглощение энергии электромагнитной волны в высокоотражающих материалах (металлах) с помощью лишь одного четвертьволнового слоя [2], [3]. В этом случае для требуемой частоты согласования рассчитывается и изготавливается волновод, как правило нестандартного сечения. В волновод устанавливается высокоотражающая нагрузка, вплотную к нагрузке со стороны источника высокочастотного сигнала располагают диэлектрический слой, толщина которого близка к четвертьволновой, изготовленный из диэлектрика с малыми потерями. Полученная структура плавным волноводным переходом может быть согласована с волноводом стандартного сечения используемы в разрабатываемом приборе.

Несмотря на простоту предложенной согласующей системы и возможность получить предельно низкий коэффициент отражения от высокоотражающей нагрузки на заданной частоте, рассматриваемые согласователи обладают особенностью, а именно — узкой полосой частот на которой обеспечивается условие согласования. Также отметим, что в таких системах согласование обеспечивается для частот, очень близких к частоте отсечки волноведущей

линии, что, в свою очередь, может привести к искажению импульсных сигналов, взаимодействующих со структурой. Данная работа является продолжением начатых ранее исследований [3 - 5], и посвящена изучению вопроса взаимодействия импульсных сигналов с согласованной высокоотражающей нагрузкой.

Рассмотрим общий случай согласования нагрузки в прямоугольном волноводе при помощи слоистой структуры. Будем считать, что согласующая структура и нагрузка плоскопараллельны и полностью заполняют поперечное сечение волновода. Пусть через согласующую структуру на нагрузку падает электромагнитная волна.

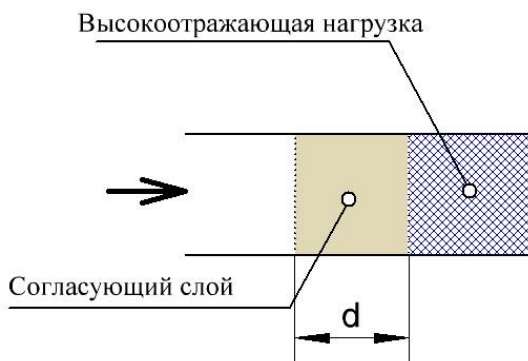


Рисунок 1

В качестве обобщенной физической модели среды воспользуемся моделью “диэлектрика с потерями”, с помощью которой физические свойства материальной среды можно записать как $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$, где ε' и ε'' — действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости среды, i — мнимая единица. Мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости характеризует потери в среде и записывается в виде $\varepsilon'' = -\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}$ [6], здесь σ - эффективная удельная проводимость нагрузки, ε_0 - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, ω - круговая частота электромагнитной волны.

В настоящей работе для анализа взаимодействия электромагнитной волны с согласующей слоистой структурой использовались метод импедансных характеристик и метод конечных разностей во временной области [6 - 9]. Метод импедансных характеристик позволяет аналитически рассчитать значения толщины согласующего слоя необходимой для согласования высокоотражающей нагрузки, а также зависимость коэффициента отражения от частоты. Однако наши исследования показали, что полученные таким образом значения толщины согласующего слоя и прогнозируемая частота полного поглощения энергии в нагрузки несколько отличается от значений полученных в эксперименте. В ходе исследования было установлено, что для получения более точных значений необходимо учитывать конечность волновода к которому подключена нагрузка, а также метод его возбуждения. Для расчета требуемой толщины слоя с учетом упомянутых особенностей конструкции в работе использовался метод конечных разностей во временной области [8], [9]. Еще одним преимуществом метода конечных разностей в нашем случае является возможность получить

временную зависимость амплитуды отраженного сигнала от согласованной нагрузки без применения обратного преобразования Фурье, которое требуется для метода импедансных характеристик.

Для апробации полученных теоретических результатов было проведено экспериментальное исследование процесса нестационарного отражения электромагнитного импульса от согласованной с волноводом высокоотражающей нагрузки. В качестве материала для изготовления согласующей пластинки был выбран тефлон. Тефлон имеет малые потери в СВЧ диапазоне частот. Тангенс угла потерь для тефлона в данном диапазоне частот меньше 10^{-3} [10]. Высокоотражающая нагрузка была изготовлена из графита, что было обусловлено простотой обработки данного материала и его высокой проводимостью [10]. Нагрузка была выполнена в виде параллелепипеда размерами 16x8x12 мм, грани которого были дополнительно отполированы.

Измерительный стенд состоял из векторного анализатора цепей ZVB-20 к которому коаксиальным кабелем через коаксиально-волноводный переход (КВП) подключался волновод сечением 23x10 мм. К волноводу сечением 23x10 мм через плавный волноводный переход подключался волновод сечением 16x8 мм, в который и устанавливалась высокоотражающая нагрузка с согласующим слоем.

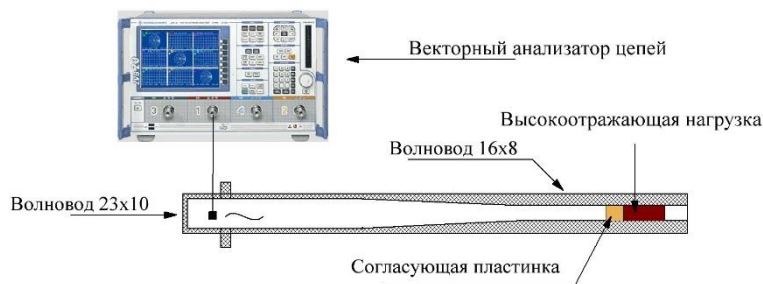


Рисунок 2

Применение волноводов разного сечения было продиктовано необходимостью снизить влияние эффектов, связанных с возбуждением волновода на частотах близких к критическим на результаты измерений.

Эксперимент приводился в два этапа. На первом этапе измерялся коэффициент отражения от высокоотражающей нагрузки и рассчитывалась ее эффективная удельная проводимость; измерялась критическая частота волновода. На втором этапе, опираясь на результаты расчета, изготавливалась серия согласующих слоев. Далее проводились измерения коэффициента отражения от согласованной системы для слоев различной толщины. Таким образом, экспериментально подбирались оптимальная толщина согласующего слоя.

Результаты, полученные на первом этапе показали, что эффективная удельная проводимость используемой нагрузки $\sigma = 130 \text{ [Ом} \cdot \text{м]}^{-1}$, критическая частота $\nu_c = 9.339 \text{ ГГц}$. Для данной проводимости и известной критической частоты, была рассчитана толщина согласующего слоя $d = 7.715 \text{ мм}$. При измерении коэффициента отражения от системы с согласующим слоем минимальный коэффициент отражения был получен для

частоты $\nu = 9.383$ ГГц и толщины слоя 8 мм, что хорошо согласуется с теоретически рассчитанными значениями.

Для получения огибающей отраженного сигнала применялось обратное преобразование Фурье. Пусть на согласованную систему падает сигнал с огибающей вида $A(t) = \exp[-(t/\tau)^2]$. Данный сигнал можно записать в виде: $S(t) = A(t)\cos(\omega t)$. Спектр сигнала может быть найден прямым преобразованием Фурье.

Если известен комплексный коэффициент отражения $r(\omega)$, то функция $H_g = r(\omega)S(\omega)$ будет спектром отраженного сигнала. Возьмем обратное преобразование Фурье от $r(\omega)$ по области положительных частот, получим аналитический сигнал:

$$Z(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} H_g(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

Модуль аналитического сигнала, $|Z(t)|$ является искомой огибающей отраженного сигнала. Таким образом, измеряя комплексный коэффициент отражения $r(\omega)$ в области положительных частот, можно получить огибающую отраженного импульса, а варьируя параметры ω и τ можно изменять центральную частоту и длительность падающего сигнала.

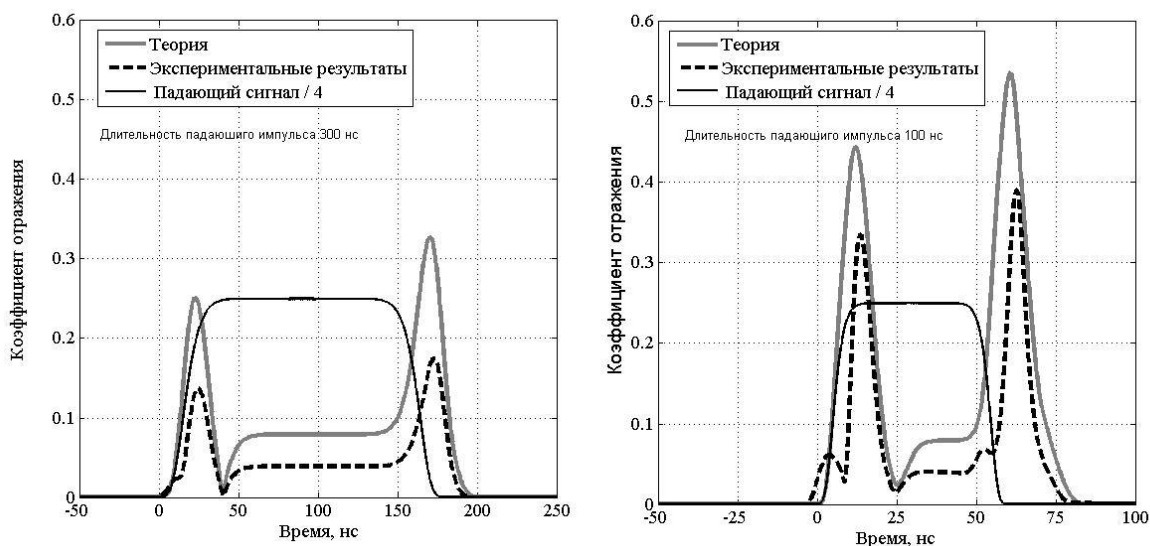


Рисунок 3

На рисунке 3 представлены результаты теоретического моделирования и экспериментально измеренные импульсы, так же показана огибающая падающего сигнала, уменьшенная в четыре раза для наглядности. Как видно из рисунка 3, результаты теоретического расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными. Видно, что при уменьшении длительности падающего импульса «расплывание» отраженного импульса увеличивается, что можно объяснить влиянием сильной волноводной дисперсии. Как и в случае нестационарного отражения от систем со слабой дисперсией [4], [5] при отражении сигнала от согласованной, рассматриваемым методом, высокоотражающей нагрузки образуются два коротких импульса в области переднего и заднего фронтов. Однако сравнивая

результаты полученные для системы со слабой дисперсией [4], [5] с полученными результатами, видим что расположение этих импульсов зеркально.

Проведенные численные и экспериментальные исследования показали, что, как и в случае нестационарного отражения амплитудно-модулированных сигналов для многослойных структур без учета дисперсии [4], [5], при отражении амплитудно-модулированного сигнала в области постоянной амплитуды падающего сигнала наблюдается практически полное поглощение волновой энергии в высокоотражающей нагрузке. В областях изменяющейся амплитуды падающего сигнала (область фронтов) в отраженном сигнале формируются короткие импульсы, длительность которых соответствует длительности фронтов. Однако в отличии от случая систем с малой дисперсией импульсы отраженного сигнала, сформированные в момент отражения фронтов падающего сигнала, имеют различную амплитуду для переднего и заднего фронтов. Амплитуда первого импульса всегда меньше амплитуды импульса сформированного задним фронтом, и их огибающая имеет более сложную форму.

Таким образом, при синтезе многослойных структур в системах с сильной волноводной дисперсией, особенно работающих с импульсными сигналами, необходимо обращать особое внимание на дисперсионные явления. Результаты полученные для систем с малой дисперсией [4] [5], как показали проведенные исследования, могут быть применены только частично.

Библиографический список

1. Баскаков А.Н. Резонансные эффекты полного интерференционного поглощения волновой энергии в тонких слабопоглощающих слоях / А.Н. Баскаков, А.В. Козарь, В.С. Колесников, Ю.А. Пирогов, А.В. Тихонравов // Письма в ЖТФ. 1976. т.2. вып.19, С. 891-893.
2. Козарь А.В. Согласование высокоотражающих волноводных СВЧ-нагрузок диэлектрической структурой минимальной волновой толщины / А.В. Козарь // Всесоюзный научный семинар "Методы синтеза и применение многослойных интерференционных систем". Москва, 1984г., С. 116-117.
3. Борщевский В.В. Экспериментальное исследование однослойного диэлектрического согласователя высокоотражающих СВЧ-нагрузок в волноводе / В.В. Борщевский, В.Н. Карпов, А.В. Козарь, А.С. Саламатов // Всесоюзный научный семинар "Методы синтеза и применение многослойных интерференционных систем". Москва, 1984. С. 178-179.
4. Козарь А.В. Явление нестационарного отражения электромагнитных волн с изменяющейся амплитудой от слоистых структур / А.В. Козарь, П.Н. Горохов, Ю.А. Бобровников, // Изв. академии. наук. Физ. 2002. т.66. №12. С. 1823
5. Козарь А.В. Явление нестационарного отражения импульсных сигналов от слоистых структур с потерями / А.В. Козарь, А.В. Трофимов // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2013. т.3 №. 5. С. 38.
6. Борн М. Основы оптики. / М. Борн, Э Вольф. // Москва: Наука, 1973.
7. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. / Л.М. Бреховских // Москва: Наука, 1973.
8. Weiland T. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields: Electronics and Communication. / T. Weiland // (AEÜ), Vol. 31, pp. 116-120, 1977.
9. Weiland T. Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods. International Journal of Numerical Modelling, / T. Weiland // Vol. 9, pp. 295-319, 1996
10. Кикоин И.А. Таблица физических величин. / Кикоин И.А. // Атомиздат. Москва, 1976