

Согласование электромагнитной волны с линейно изменяющейся амплитудой с поглощающей подложкой

П. Н. Горохов,^а А. В. Козарь^б

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Поступила в редакцию 26.02.2019, после доработки 18.03.2019, принята к публикации 19.03.2019.

Рассмотрено отражение электромагнитной волны от структуры, состоящей из двух или трех непоглощающих слоев, нанесенных на поглощающую полубесконечную подложку. В качестве падающей волны взята плоская волна с линейно изменяющейся амплитудой и заданной частотой заполнения. Найдены условия на параметры слоев, обеспечивающие полное согласование падающей волны с изменяющейся амплитудой с подложкой. Исследовано влияние малых вариаций параметров слоев на эффект полного согласования.

Ключевые слова: интерференция, слоистые структуры, электромагнитные импульсы, согласование волн с подложкой, нестационарное отражение импульсов.

УДК: 535.4. PACS: 42.25.-p.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в случае нормального падения плоской волны постоянной амплитуды согласование при помощи одного $\lambda/4$ слоя реализуется, когда его показатель преломления n_1 связан с показателем преломления подложки n_s и внешней среды n_0 соотношением:

$$n_0 n_s = n_1^2.$$

Фазовой толщиной слоя будем называть величину $\varphi = \frac{2\pi n d}{\lambda}$, где n — показатель преломления, d — геометрическая толщина слоя, λ — длина волны в вакууме.

Согласование монохроматического излучения любой заданной частоты с подложкой в рассматриваемом случае возможно также при помощи двух и более слоев $\lambda/4$, а также слоев с различной фазовой толщиной, но кратной либо $\lambda/4$, либо $\lambda/2$. Во всех этих случаях показатели преломления слоев принимают строго определенные значения [1]. Существует также класс так называемых тонкослойных интерференционных структур (ТИС), в которых, изменяя определенным образом фазовые толщины слоев, можно обеспечить эффект полного согласования для подложек с показателями преломления, лежащими в интервале $n_1^2 < n_s n_0 < n_2^2$ ($n_2 > n_1$) или $n_2^2 < n_s n_0 < n_1^2$ ($n_1 > n_2$) [2–6].

Стационарное распределение поля волны в произвольной слоистой структуре устанавливается за характерное время t_s после скачкообразного включения источника излучения. Если в течение некоторого времени t_p происходит изменение амплитуды падающей волны, то по окончании этого времени (переходного процесса) в структуре установится новое стационарное распределение поля. Если структура согласующая, то на фоне нулевого стационарного отражения будет наблюдаться отраженный импульс длительности t_p , либо t_s (в зависимости от соотношения между t_p и t_s). В этом состоит физическая суть явления нестационарного отражения импульсов

от просветляющих структур [7–10]. При этом если $t_p \gg t_s$, то амплитуда отраженного импульса с хорошей точностью описывает производную по времени от амплитуды падающего импульса. Так, например, в случае импульса с трапециевидальной огибающей с линейным изменением фронтов получим два прямоугольных отраженных импульса (рисунок, а) [7].

Для коротких импульсов длительность переходного процесса t_p может стать сравнимой с длительностью сигнала, поэтому учет влияния нестационарного процесса на формирование отраженного и прошедшего сигналов становится необходимым. В этом случае отраженные импульсы становятся объектом самостоятельного исследования и находят различные применения [7–10]. Однако в ряде случаев явление нестационарного отражения может рассматриваться как паразитное. Например, когда необходимо максимально использовать энергию падающего импульса. В этом случае желательно получить нулевое отражение не только в области плоской вершины импульса, но и в области его фронтов. То есть необходимо синтезировать такую интерференционную структуру, нанесенную на подложку, которая является согласующей для волны с линейно изменяющейся амплитудой, или в математической формулировке: синтезировать структуру, формирующую отраженный сигнал с амплитудой, пропорциональной второй производной от амплитуды падающего импульса. В этом случае сигнал нестационарного отражения формируется только в областях изменения наклона огибающей падающего импульса и будет представлять собой последовательность пикообразных импульсов с пренебрежимо малой суммарной энергией (рисунок, б) [11, 12].

В настоящей работе показано, что при помощи относительно простых интерференционных структур, состоящих из двух или трех непоглощающих слоев, нанесенных на поглощающую полубесконечную подложку, можно получить эффект полного согласования волны с линейно изменяющейся амплитудой. При этом требования к показателям преломления слоев оказываются менее жесткими, чем в случае непоглощающей подложки (из-за возможности изменить фазовую толщину одного из слоев).

^а E-mail: gorokhov@akado.ru

^б E-mail: avk@phys.msu.ru

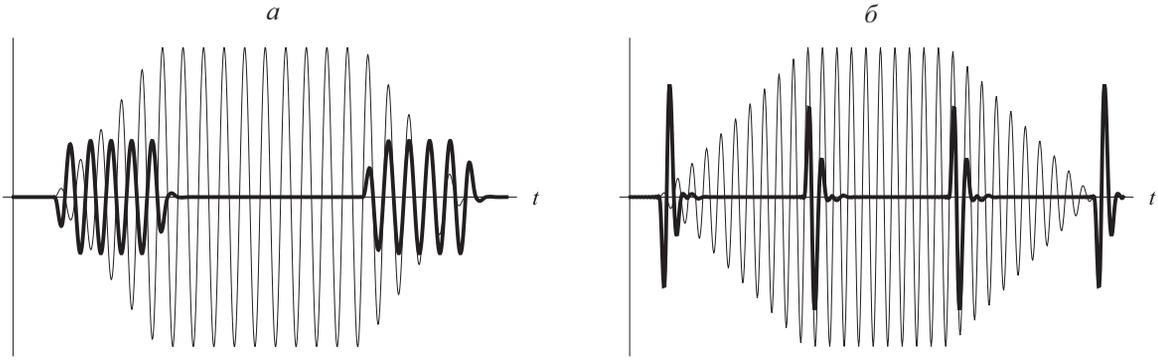


Рисунок. *а* — дифференцирование огибающей падающего импульса при помощи однослойной согласующей структуры, *б* — взятие второй производной от огибающей падающего импульса при помощи двухслойной согласующей структуры. Тонкие линии — падающий импульс, жирные линии — отраженный импульс. Для наглядности отраженные импульсы умножены на 10 и на 20 соответственно

Алгоритм поиска подобных структур может быть основан на связи между описанием отраженного сигнала в частотной и во временной областях. Допустим, что коэффициент отражения от структуры $R(\nu)$ (АЧХ системы) может быть разложен в ряд Тейлора в окрестности частоты ν_0 — частоты заполнения падающей волны. Если функция $R(\nu)$ имеет ноль второго порядка в точке ν_0 , то разложение в ряд начинается с квадратичного члена. Предположим, что спектр падающего сигнала сосредоточен в окрестности частоты ν_0 и достаточно быстро спадает на бесконечности. Тогда умножение спектра падающего сигнала на квадратичный член разложения во временной области соответствует взятию второй производной от огибающей падающего импульса (например, [13]). Значит, необходимо искать такие параметры структуры (показатели преломления и фазовые толщины слоев), для которых $R(\nu)$ имеет ноль второго порядка в точке ν_0 . Многослойные структуры такого типа известны в литературе, посвященной вопросам синтеза фильтров и просветляющих покрытий [14, 15], как полосовые фильтры второго порядка с максимально плоской амплитудно-частотной характеристикой. Они встречаются как в оптике [16], так и в микроволновой технике [15, 17].

1. ДВУХСЛОЙНАЯ СОГЛАСУЮЩАЯ СТРУКТУРА

Простейшей структурой, дающей эффект согласования волны с линейно изменяющейся амплитудой, является структура, состоящая из двух непоглощающих $\lambda/4$ -слоев, нанесенных на непоглощающую подложку. Показатели преломления внешнего слоя n_1 , слоя, прилегающего к подложке n_2 , и подложки n_s связаны соотношениями $n_2 = n_1^3$, $n_s = n_1^4$ [12, 16]. Здесь и далее полагаем, что $n_0 = 1$. Существуют также структуры, состоящие из двух $\lambda/2$ -слоев и из трех $\lambda/4$ -слоев, нанесенных на непоглощающую подложку, дающие эффект согласования [12]. Но все они весьма чувствительны к малым изменениям параметров слоев и потому сложны при практической реализации.

Рассмотрим структуру, состоящую из двух непоглощающих слоев, нанесенных на поглощающую подложку. Показатели преломления слоев и подложки (считая от внешней среды к подложке) — n_1 , n_2 , $n_s + ik_s$. Используя обычную процедуру, находим

коэффициент отражения от структуры $R(\nu)$ (АЧХ системы). В настоящей работе рассматривается взаимодействие узкополосных сигналов с согласующей структурой. Считая дисперсию материалов слоев и подложки малой в рассматриваемом спектральном диапазоне, будем полагать, что ее влияние на изучаемое явление пренебрежимо мало. Пусть для некоторой частоты ν_0 удвоенная фазовая толщина первого слоя равна π (т. е. это $\lambda/4$ -слой), а удвоенная фазовая толщина второго — φ_2 . Рассмотрим сначала первый член разложения функции $R(\nu)$ в ряд Тейлора. Приравниваем нулю его действительную и мнимую части. Из полученной системы уравнений находим условия согласования монохроматической волны с рассматриваемой подложкой:

$$n_s = \frac{2n_1^2 n_2^2}{n_1^4 + n_2^2 + (n_2^2 - n_1^4) \cos \varphi_2}, \quad (1)$$

$$k_s = \frac{n_2(n_2^2 - n_1^4) \sin \varphi_2}{n_1^4 + n_2^2 + (n_2^2 - n_1^4) \cos \varphi_2}. \quad (2)$$

Пусть r_{2s} — френелевский коэффициент отражения на границе второй слой — подложка. Если записать его, используя условия согласования (1), (2), получим:

$$r_{2s} = \frac{n_2 - n_s - ik_s}{n_2 + n_s + ik_s} = -\frac{n_1^2 - n_2}{n_1^2 + n_2} \exp(-i\varphi_2). \quad (3)$$

Из (3) видно, что модуль r_{2s} остается таким же, как в случае согласования непоглощающей подложки двумя $\lambda/4$ слоями с такими же n_1 , n_2 , а изменение фазовой толщины φ_2 (по сравнению с π) компенсирует дополнительный фазовый сдвиг при отражении от подложки (вызванный наличием поглощения).

Рассмотрим теперь второй член разложения функции $R(\nu)$. Из условия равенства его нулю и из (1), (2) находим соотношение между n_1 , n_2 и φ_2 , при котором наблюдается эффект полного согласования волны с линейно изменяющейся амплитудой:

$$n_2 = n_1 \frac{n_1^2 - 1 + \sqrt{(n_1^2 - 1)^2 + 4n_1^2 \left(\frac{\varphi_2}{\pi}\right)^2}}{2\frac{\varphi_2}{\pi}}. \quad (4)$$

Очевидно, что при $\varphi_2 = \pi$ решение (4) сводится к решению для непоглощающей подложки (см. выше).

Из (4) видно, что возможность изменения φ_2 дает дополнительную степень свободы при выборе n_2 . При этом задание φ_2 (а также n_1) однозначно определяет и параметры подложки (по (1), (2)). Как правило, требуется по заданным параметрам подложки (n_s и k_s) определить необходимые параметры слоев согласующей структуры. Тогда уравнения (1), (2) можно разрешить относительно двух других переменных, например n_2 и φ_2 . Детальный их анализ совместно с (4) показал, что в широком интервале значений n_s и k_s (причем k_s может изменяться от нуля до нескольких единиц) для любой пары n_s и k_s существует по два значения n_2 , соответствующих различным n_1 и φ_2 . Для каждой пары n_s и k_s функции n_2 и φ_2 , полученные из (1), (2), можно рассматривать как параметрическое задание функции n_2 (φ_2). Анализ функции n_2 (φ_2) совместно с (4) показал, что существует целое множество пар n_s и k_s , для которых ход функции n_2 (φ_2) совпадает с ходом (4) в некоторой окрестности изменения φ_2 . Это позволяет для данных пар n_s и k_s изменять остальные параметры независимо в определенных интервалах значений. В качестве типичного примера рассмотрим следующий. Возьмем пару $n_s = 4$ и $k_s = 1.04$. Найдем для нее параметры слоев, обеспечивающие полное согласование волны с линейно изменяющейся амплитудой: $n_1 = 1.85$, $n_2 = 4.66$, $\varphi_2 = 2.5\pi$. Пусть вариация n_1 составляет 0.01–0.05. При любом новом значении n_1 из этого интервала значений режим согласования нарушится, появится отраженный сигнал с линейно изменяющейся амплитудой со скоростью изменения амплитуды в 3–7 раз меньше, чем у падающего сигнала. После этого, варьируя φ_2 , можно подобрать такой n_2 , что скорость изменения амплитуды отраженного сигнала уменьшится в 6–15 раз. При этом вариация n_2 составит 0.2–0.5. То есть возможно практически сохранить эффект согласования при достаточно малых вариациях параметров слоев структуры.

2. ТРЕХСЛОЙНАЯ СОГЛАСУЮЩАЯ СТРУКТУРА

Рассмотрим структуру, состоящую из трех непоглощающих слоев, нанесенных на поглощающую подложку, с показателями преломления слоев и подложки (считая от внешней среды к подложке) — n_1 , n_2 , n_3 , $n_s + ik_s$. Пусть для некоторой частоты ν_0 удвоенная фазовая толщина первого и второго слоев равна π (т.е. это $\lambda/4$ слои), а удвоенная фазовая толщина третьего — φ_3 . Аналогично случаю двухслойной просветляющей структуры находим сначала условия согласования монохроматической волны с подложкой:

$$n_s = \frac{2n_1^2 n_2^2 n_3^2}{n_2^4 + n_1^4 n_3^2 + (n_1^4 n_3^2 - n_2^4) \cos \varphi_3}, \quad (5)$$

$$k_s = \frac{n_3(n_1^4 n_3^2 - n_2^4) \sin \varphi_3}{n_2^4 + n_1^4 n_3^2 + (n_1^4 n_3^2 - n_2^4) \cos \varphi_3}. \quad (6)$$

Точно так же получим френелевский коэффициент отражения r_{3s} на границе третий слой—подложка, обладающий свойствами, аналогичными r_{2s} (см. (3)):

$$r_{3s} = \frac{n_3 - n_s - ik_s}{n_3 + n_s + ik_s} = -\frac{n_2^2 - n_1^2 n_3}{n_2^2 + n_1^2 n_3} \exp(-i\varphi_3).$$

Аналогично рассматривая второй член разложения в ряд Тейлора функции $R(\nu)$ вместе с (5), (6), находим соотношение между n_1 , n_2 , n_3 и φ_3 , при котором наблюдается эффект полного согласования волны с линейно изменяющейся амплитудой:

$$n_3 = n_2 \frac{n_1 n_2 - n_1^4 - n_1^3 n_2 + n_2^2}{2n_1^4 \frac{\varphi_3}{\pi}} + n_2 \frac{\sqrt{(n_1 n_2 - n_1^4 - n_1^3 n_2 + n_2^2)^2 + 4n_1^4 n_2^2 \left(\frac{\varphi_3}{\pi}\right)^2}}{2n_1^4 \frac{\varphi_3}{\pi}}. \quad (7)$$

Заметим, что если в (7) положить $n_3 = n_2$, то получится решение для двух слоев (см. (4)), но с увеличенной фазовой толщиной φ_2 :

$$n_2 = n_1 \frac{n_1^2 - 1 + \sqrt{(n_1^2 - 1)^2 + 4n_1^2 \left(\frac{\varphi_2 + \pi}{\pi}\right)^2}}{2\frac{\varphi_2 + \pi}{\pi}}.$$

Уравнения (5), (6) также можно разрешить относительно n_3 и φ_3 . Их анализ совместно с (7) показывает, что задание n_3 , n_s и k_s определяет также φ_3 , а n_1 либо n_2 можно задавать произвольно (задание одного однозначно определит второй). Кроме того, так же, как и в случае двухслойной структуры, можно подобрать параметры слоев и подложки таким образом, что при их варьировании эффект согласования будет нарушен, но незначительно (в некотором интервале изменения параметров). Например, можно выбрать произвольно два параметра — n_2 и n_s . Они определят n_1 и n_3 . После этого можно выбирать различные k_s в интервале от нуля до нескольких десятых и только за счет варьирования φ_3 практически сохранить эффект согласования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере двух- и трехслойных структур показано, что использование поглощающей подложки позволяет синтезировать структуры с более высокой устойчивостью к изменениям параметров слоев при реализации согласующих структур с нулевой 2-й производной на линейно изменяющихся фронтах падающего сигнала.

Синтез подобных структур может быть основан на том факте, что коэффициент отражения от структуры $R(\nu)$ (АЧХ системы) имеет ноль второго порядка на частоте ν_0 — частоте заполнения падающего сигнала.

Результаты статьи можно обобщить на случай других комбинаций слоев в структуре, а также на случай, когда показатель преломления внешней среды n_0 отличается от 1.

Описанные структуры могут быть использованы в качестве оптических преобразователей (оптических логических элементов), в данном случае дифференциаторов второго порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокс Дж. Т., Хасс Г. // Физика тонких пленок. Т. 2 / Под ред. Г. Хасса. М., 1967.
2. Козарь А. В. // Труды Всесоюзной научно-технич. конференции «Проектирование и применение радиоэлектронных устройств на диэлектрических волноводах и резонаторах». Саратов, 1983. С. 136.

3. Козарь А.В. // Труды Всесоюзного научн. семинара «Методы синтеза и применение многослойных интерференционных систем». М., 1984. С. 118.
4. Козарь А.В. // Оптика и спектроскопия. 1985. **59**. № 5. С. 1132.
5. Козарь А.В. // Оптика и спектроскопия. 1988. **64**. № 5. С. 1130.
6. Козарь А.В., Путрина Е.В., Фионова О.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1995. № 3. С. 39. (Kozar' A. V., Putrina E. V., Fionova O. V. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 1995. **1995**. N 3. P. 36.)
7. Козарь А.В., Бобровников Ю.А., Горохов П.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2002. **66**, № 12. С. 1823.
8. Бобровников Ю.А., Горохов П.Н., Козарь А.В. // Квантовая электроника. 2003. **33**, № 11. С. 1019.
9. Бобровников Ю.А., Козарь А.В., Горохов П.Н. // Труды Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» / МГУ им. М.В. Ломоносова. 2002. **1**, № 5. С. 53.
10. Бобровников Ю.А., Козарь А.В., Горохов П.Н. // Сб. расширенных тезисов докладов науч. конференции «Ломоносовские чтения». Секция физики. Подсекция оптики и лазерной физики. 2004. **1**. С. 31.
11. Козарь А.В., Трофимов А.В., Потапов А.А. // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 4.
12. Трофимов А.В. Исследование процессов нестационарного отражения электромагнитных импульсов от слонстых структур: Дисс. . . канд. физ.-мат. наук. МГУ им. М.В. Ломоносова. Физический факультет. Москва. 2016.
13. Шилов Г.Е. Математический анализ. Специальный курс. М., 1961.
14. Macleod H. A. // *Thin-Film Optical Filters*. CRC, 2001.
15. Фельдштейн А.Л., Явля Л.В., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. М.: Советское радио, 1967.
16. Krepelka J. // *Jemna Mechanica A Optica*. 1992. (3–5). P. 53.
17. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. М.: Связь, 1971.

Matching of a Linearly Varying Amplitude Electromagnetic Wave with an Absorbing Substrate

P. N. Gorokhov^a, A. V. Kozar^b

Department of Photonics and Microwave Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^agorokhov@akado.ru, ^bavk@phys.msu.ru.

This work considers the reflection of an electromagnetic wave off a structure consisting of two or three non-absorbing layers on an absorbing semi-infinite substrate. A plane wave with a linearly varying amplitude and a given carrier frequency is taken as the incident wave. The conditions on the layers parameters for a complete matching of a varying amplitude incident wave with the substrate are determined. The effect of small variations in the parameters of the layers on the complete matching is investigated.

Keywords: interference, layered structures, electromagnetic pulses, matching of waves with substrate, nonstationary pulse reflection.

PACS: 42.25.-p.

Received 26 February 2019.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2019. **74**, No. 4. Pp. 374–377.

Сведения об авторах

1. Горохов Павел Николаевич — физик; тел.: (495) 939-27-75, e-mail: gorokhov@akado.ru.

2. Козарь Анатолий Викторович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-27-75, e-mail: avk@phys.msu.ru.