



Список литературы

1. *Ахмедиев Н. Н., Анкевич А.* Солитоны. Нелинейные импульсы и пучки. М.: Физматлит, 2003. 304 с.
2. *Binh L. N.* Optical multi-bound solitons. USA, Kentucky: CRC Press, 2015. 567 p.
3. *Soto-Crespo J. M., Grelu Ph., Akhmediev N., Devine N.* Soliton complexes in dissipative systems: Vibrating, shaking, and mixed soliton pairs // *Phys. Rev. E.* 2007. Vol. 75. P. 016613.
4. *Chang W., Akhmediev N., Wabnitz S.* Effect of an external periodic potential on pairs of dissipative solitons // *Phys. Rev. A.* 2009. Vol. 80. P. 013815.
5. *Sysoliatin A. A., Dianov E. M., Konyukhov A. I., Melnikov L. A., Stasyuk V. A.* Soliton splitting in a dispersion-oscillating fiber // *Laser Physics.* 2007. Vol. 17, № 11. P. 1306–1310.
6. *Выслоух В. А., Чередни И. В.* Многосолитонные составяющие решений нелинейного уравнения Шредингера с возмущающим членом // *Теоретическая и математическая физика.* 1987. Т. 71. С. 13–20.
7. *Konyukhov A. I., Dorokhova M. A., Melnikov L. A., Plastun A. S.* Inelastic collision and fusion of optical solitons in dispersion oscillating fiber // *Laser Physics Lett.* 2015. Vol. 12, № 5. P. 1–5.

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

УДК 621.372.2: 620.179

ВОЛНОВОДНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В СИСТЕМЕ С НАНОМЕТРОВЫМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ СЛОЕМ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

**Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев,
Е. В. Латышева, В. Б. Феклистов**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: Usanovda@info.sgu.ru

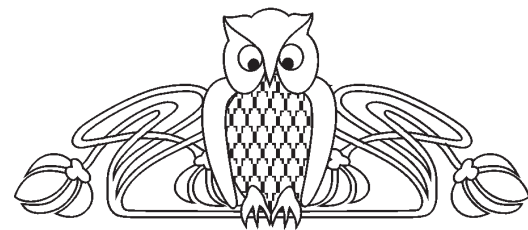
Установлена высокая чувствительность частотных зависимостей коэффициента прохождения электромагнитной волны к изменению толщин нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрические пластины, в случае возникновения волноводно-диэлектрического резонанса при частичном заполнении структурой поперечного сечения волновода по ширине и асимметричном размещении относительно его середины. Обоснован теоретически и экспериментально СВЧ-метод измерения толщины металлических пленок в слоистых металлодиэлектрических структурах, частично заполняющих поперечное сечение волновода.

Ключевые слова: волноводно-диэлектрический резонанс, металлодиэлектрические структуры, нанометровые металлические слои, измерение толщины на СВЧ.

Waveguide-dielectric Resonance in Systems with Nanometer Metal Layer on Dielectric Substrate

**D. A. Usanov, A. V. Skripal, D. V. Ponomarev,
E. V. Latysheva, V. B. Feklistov**

High sensitivity of an electromagnetic wave transmission spectra to change the thickness of the nanometer metal layers on dielectric plates in the case of the waveguide-dielectric resonance emergence due to the waveguide cross section is partially filled across the width



and asymmetrically occupied relative to its middle by the investigated structure has been established. The microwave method of measurements the metal films thickness in the layered metal-dielectric structures which are partially filling the cross section of the waveguide has been theoretically and experimentally justified.

Key words: waveguide-dielectric resonance, metal-dielectric structures, nanometer metal layers, microwave measurements of thickness.

DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-2-86-90

Введение

Для определения параметров материалов и структур, включающих нанометровые металлические слои, используемых при создании приборов полупроводниковой СВЧ-электроники, наиболее предпочтительными являются СВЧ-методы измерений [1–5].

С целью повышения чувствительности таких методов используются СВЧ-схемы, в которых частотная зависимость спектров отражения и прохождения для измеряемых слоистых структур резко изменяется при вариации параметров входящих в их состав слоев [6–10].



Одним из таких методов является метод, основанный на использовании одномерных волноводных СВЧ фотонных кристаллов с нарушением периодичности. В фотонной запрещенной зоне такого кристалла может проявляться резонансная особенность [11], называемая примесной модой колебаний [12] и обладающая высокой чувствительностью к параметрам нарушения.

Авторы [7–10] предложили использовать в качестве такого нарушения металлодиэлектрические или полупроводниковые структуры и определять их параметры по частотным зависимостям коэффициентов прохождения и отражения электромагнитного излучения в окрестности резонансной особенности.

Однако добротность примесной моды колебаний может оказаться недостаточной для достижения высокой чувствительности частотных зависимостей коэффициентов прохождения и отражения электромагнитного излучения к вариации параметров металлодиэлектрических структур при измерении сверхтонких слоев с толщинами, составляющими единицы нанометров.

В работе [13] описана возможность использования волноводно-диэлектрического резонанса для определения электропроводности полупроводникового образца толщиной 10 мкм и более по изменению его резонансной частоты и добротности. Задача по исследованию возможности измерения параметров нанометровых металлических слоев на диэлектрической подложке авторами [13] не решалась.

В представленной работе рассмотрена возможность использования волноводно-диэлектрического резонанса для реализации высокочувствительного СВЧ-метода измерения параметров нанометрового металлического слоя, нанесенного на диэлектрическую подложку.

Модель волновода с металлодиэлектрической структурой

Исследовалось взаимодействие электромагнитного излучения трехсантиметрового диапазона длин волн с образцом, представляющим собой двухслойную структуру, состоящую из пластины поликора (Al_2O_3 , $\epsilon=9.6$) размером $10 \times 10 \times 1$ мм с нанесенным нанометровым металлическим слоем (TaAlN) толщиной t (рис. 1).

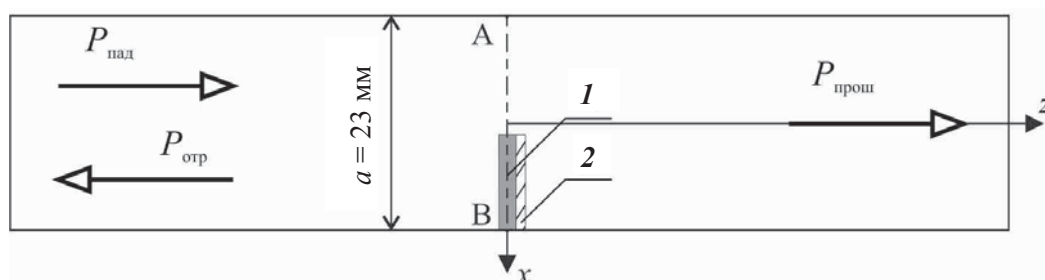


Рис. 1. Расположение исследуемой структуры в волноводе: 1 – Al_2O_3 , 2 – TaAlN. $P_{\text{пад}}$ – падающая мощность, $P_{\text{прош}}$ – прошедшая мощность, $P_{\text{отр}}$ – отраженная мощность

Исследуемая структура размещалась асимметрично относительно середины волновода сечением 23×10 мм, полностью заполняя его по высоте и частично по ширине.

Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) исследуемой структуры было проведено при помощи системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS.

При частичном заполнении исследуемой структурой поперечного сечения волновода возникает волноводно-диэлектрический резонанс, проявляющийся в резком ослаблении на резонансной частоте прошедшей волны и увеличении амплитуды отраженной.

Геометрические размеры и электрофизические параметры диэлектрической пластины и сте-

пень заполнения образцом поперечного сечения волновода подбирались таким образом, чтобы пик ослабления располагался в трехсантиметровом диапазоне длин волн.

Результаты расчета частотных зависимостей квадратов модулей коэффициентов прохождения электромагнитного излучения ($|D|^2$), взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой при различных значениях толщины t нанометровой металлической пленки, представлены на рис. 2.

Как следует из результатов расчета, при частичном заполнении поперечного сечения волновода пластиной поликора без металлической пленки частотная зависимость коэффициента прохождения характеризуется наличием пика ослабления на частоте 11.6 ГГц, величина которого составляет -26.7 дБ.

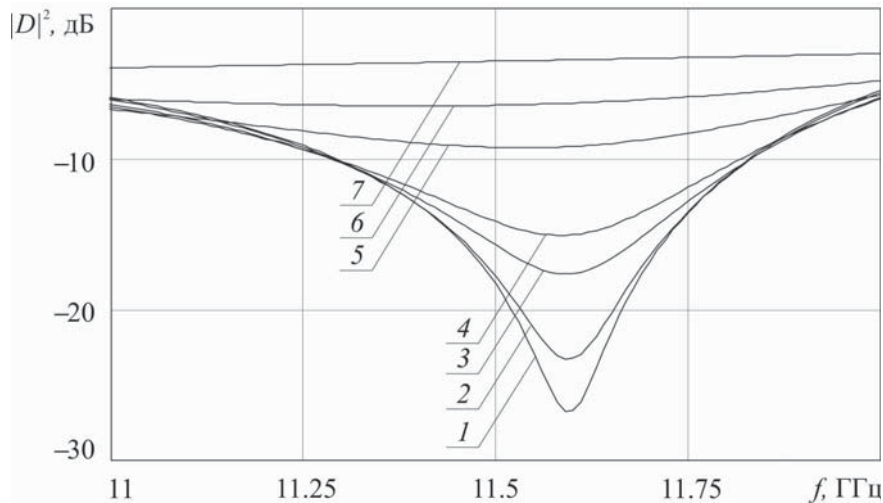


Рис. 2. Расчетные частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой: 1 – пластина поликора без металлической пленки, 2 – $t=1$ нм, 3 – $t=3$ нм, 4 – $t=4$ нм, 5 – $t=7$ нм, 6 – $t=13.5$ нм, 7 – $t=40$ нм

Результаты расчета распределения напряженности электромагнитного поля на частоте, соответствующей пику ослабления, в поперечном сечении волновода вдоль линии АВ представлены на рис. 3. Область, занимаемая исследуемой структурой вдоль этой линии, заштрихована.

Как следует из результатов расчета на частоте, соответствующей пику ослабления, в поперечном сечении волновода возникает распределение поля (см. рис. 3), соответствующее стоячей волне с двумя пучностями (преимущественному возбуждению в волноводе волны H_{20}).

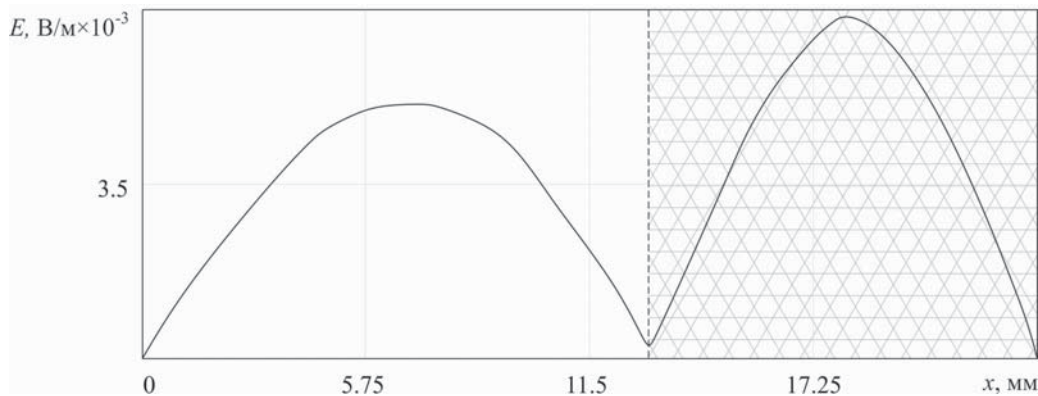


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля E электромагнитной волны на частоте 11.6 ГГц в поперечном сечении волновода вдоль линии АВ

Нанесение тонкой металлической пленки оказывает влияние на величину ослабления, вносимого образцом на резонансной частоте.

При нанесении металлической пленки толщиной более 7.0 нм на частотной зависимости коэффициента пропускания резонансная особенность исчезает.

На рис. 4 представлены расчетные зависимости квадратов модулей коэффициента прохождения от толщины металлической пленки на частоте $f=11.6$ ГГц, соответствующей пику ослабления

в отсутствие металлического слоя. На указанной частоте увеличение толщины металлического слоя от 0 до 1 нм приводит к изменению величины коэффициента прохождения от -26.7 до -23.3 дБ. В этом диапазоне толщин расчетная чувствительность $d(|D|^2)/dt$ достигает 3.4 дБ/нм.

Экспериментальные исследования

Измерения частотных зависимостей квадратов модулей коэффициентов прохождения $|D|^2(f)$ электромагнитного излучения, взаимодействующего

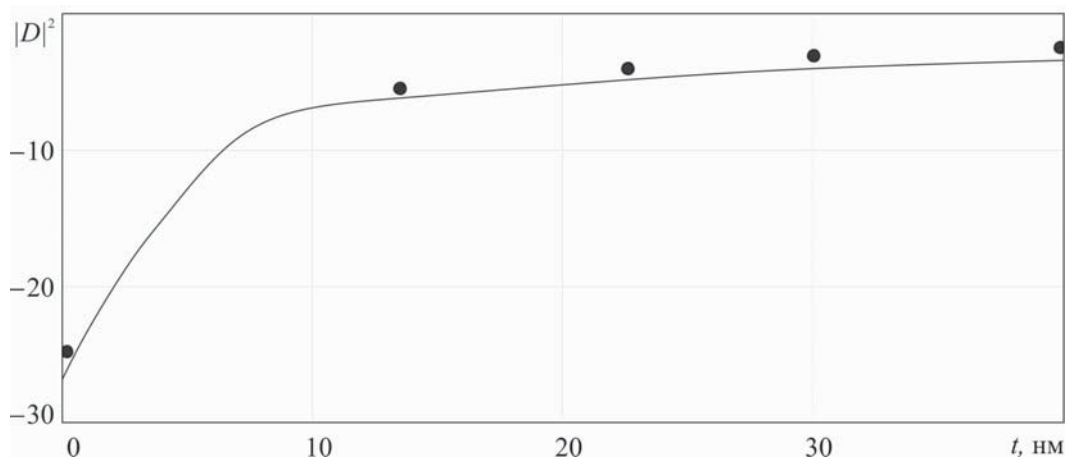


Рис. 4. Расчетная (линия) и экспериментальная (точки) зависимости квадрата модуля коэффициента прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой, от толщины металлической пленки на фиксированной частоте $f = 11.6$ ГГц

ющего с металлодиэлектрической структурой, расположенной асимметрично относительно середины волновода, полностью заполняя его по высоте и частично по ширине, проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA N5230A (США, Agilent).

Толщины металлических слоев (TaAlN), нанесенных на поликоровые подложки, были измерены с помощью атомно-силового микроскопа Agilent 5600LS AFM (США, Agilent).

Экспериментальные значения $|D|^2$ на фиксированной частоте $f = 11.6$ ГГц при геометрических размерах и электрофизических параметрах металлодиэлектрической структуры, соответствующих используемым при численном моделировании, представлены на рис. 4.

Следует отметить хорошее количественное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными. Некоторое расхождение между расчетными и экспериментальными данными может быть обусловлено пренебрежением конечной проводимостью стенок волновода и неконтролируемой неоднородностью геометрических и электрофизических параметров используемых структур.

Полученные расчетные и экспериментальные данные свидетельствуют о возможности использования волноводно-диэлектрического резонанса для измерения параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку, при частичном заполнении исследуемой металлодиэлектрической структурой поперечного сечения волновода.

Для определения электрофизических параметров материалов и структур СВЧ-методом

измерения нанометровых металлических слоев, основанным на использовании СВЧ фотонных кристаллов с нарушением периодичности, в качестве которого выступает измеряемая структура, авторами [7–10] используется один из способов решения обратной задачи. Величина чувствительности $d(|D|^2)/dt$ для одномерного волноводного фотонного кристалла, содержащего нарушение в виде металлодиэлектрических структур с приведенными выше геометрическими размерами и электрофизическими параметрами, составляет ~ 0.4 дБ/нм. Таким образом теоретически обоснованная чувствительность коэффициента прохождения к вариации толщины в предложенном в настоящей работе методе в несколько раз превышает чувствительность метода на основе использования СВЧ фотонных кристаллов. В то же время решение обратной задачи для определения параметров металлодиэлектрической структуры, частично заполняющей поперечное сечение волновода, связано с необходимостью использования ЭВМ при решении прямой задачи. Возникающая погрешность при реализации численных методов с помощью ЭВМ еще и при решении обратной задачи приводит к ограничению области параметров нанослоев металла, которые могут быть определены данным методом.

С целью повышения чувствительности СВЧ-методов измерения сверхтонких нанометровых проводящих пленок возможно использование волноводно-диэлектрического резонанса, обладающего большей величиной добротности и реализующегося при размещении исследуемой структуры перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода.



Заключение

Таким образом, в настоящей работе исследованы особенности волноводно-диэлектрического резонанса, возникающего в результате частичного заполнения исследуемой металлодиэлектрической структурой поперечного сечения волновода по ширине и асимметричного размещения относительно его середины.

Обоснована теоретически и установлена экспериментально высокая чувствительность коэффициента прохождения электромагнитной волны к изменению толщины сверхтонкого нанометрового металлического слоя, входящего в состав металлодиэлектрической структуры.

Показана возможность использования волноводно-диэлектрического резонанса для разработки методов измерения параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку, при частичном заполнении исследуемой структурой поперечного сечения волновода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1376 и 1575) и стипендии Президента РФ (СП-2622.2015.3).

Список литературы

1. Гершензон Е. М., Литвак-Горская Л. Б., Плохова Л. А., Зарубина Т. С. Методы определения параметров полупроводников и полупроводниковых пленок на СВЧ // Полупроводниковые приборы и их применение / под ред. Е. А. Федотова. М. : Сов. радио, 1970. Вып. 23. С. 3–48.
2. Усанов Д. А. СВЧ-методы измерения параметров полупроводников. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1985. 55 с.
3. Арапов Ю. Г., Давыдов А. Б. Волноводные методы измерения электрофизических параметров полупроводников на СВЧ // Дефектоскопия. 1978. № 11. С. 63–87.
4. Asfar M. N., Birch J. R., Clarke R. N. The Measurement of the Properties of Materials // Proc. IEEE. 1986. Vol. 74, № 1. P. 183–199.
5. Усанов Д. А., Горбатов С. С. Эффекты ближнего поля в электродинамических системах с неоднородностями и их использование в технике СВЧ. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2011. 392 с.
6. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения // ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 5. С. 112–117.
7. Dmitry Usanov, Alexander Skripal, Anton Abramov, Anton Bogolubov, Vladimir Skvortsov, Merdan Merdanov. Measurement of the Metal Nanometer Layer Parameters on Dielectric Substrates using Photonic Crystals based on the Waveguide Structures with Controlled Irregularity in the Microwave Band // Proc. of 37rd European Microwave Conference. Munich, Germany, 2007. P. 198–201.
8. Никитов С. А., Гуляев Ю. В., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. Определение проводимости и толщины полупроводниковых пластин и нанометровых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов // Докл. Академии наук. 2013. Т. 448, № 1. С. 35–37.
9. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., Латышева Е. В. Многопараметровые измерения эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных сверхвысокочастотных фотонных кристаллов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 1. С. 45–53.
10. Усанов Д. А., Мерданов М. К., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. СВЧ фотонные кристаллы. Новые сферы применения // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15, вып. 1. С. 57–73.
11. Yablonovitch E., Gmitter T. J., Meade R. D., Rappe A. M., Brommer K. D., Joannopoulos J. D. Donor and acceptor modes in photonic band structure // Phys. Rev. Lett. 1991, Dec. Vol. 67, № 24. P. 3380.
12. Belyaev B. A., Voloshin A. S., Shabanov V. F. Study of Q-factor of impurity mode resonance in microstrip model of 1D-photonic crystal // Doklady Physics (Doklady Akademii Nauk). 2005. Vol. 403, № 3. P. 319.
13. Занин В. И., Усанов Д. А., Феклистов В. Б. Определение электрофизических параметров полупроводника волноводным резонансным методом // Электродинамика слоисто-неоднородных структур СВЧ : межвуз. сб. науч. ст. Самара : Самар. ун-т, 1995. С. 88–99.