

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

имени Н.Г. Чернышевского

Использование волноводно-диэлектрического резонанса для измерения параметров нанометровых металлических пленок в слоистых структурах

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 двух способах размещения исследуемой структуры в волноводе. 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 параметров на СВЧ.

Разработка высокочувствительных СВЧ-методов измерения электрофизических параметров материалов имеет важное значение при создании современных слоистых структур, применяемых в микро- и наноэлектронике.

В настоящей работе рассмотрена возможность использования волноводно-диэлектрического резонанса [1–3] для реализации высокочувствительного СВЧ-метода измерения параметров нанометрового металлического слоя, нанесенного на диэлектрическую подложку.

Исследовалось взаимодействие электромагнитного излучения трехсантиметрового диапазона длин волн с двухслойной структурой, состоящей из пластины поликора с нанесенным нанометровым металлическим слоем (толщиной t и электропроводностью σ), при ее размещении в волноводе сечением 23×10 мм двумя способами:

- 1) асимметрично относительно середины волновода, полностью заполняя его по высоте и частично по ширине (см. рис.1 а);
- 2) перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси (см. рис.1 б).

В обоих случаях наблюдается возникновение волноводно-диэлектрического резонанса, проявляющегося в резком ослаблении на резонансной частоте прошедшей волны и увеличении амплитуды отраженной.

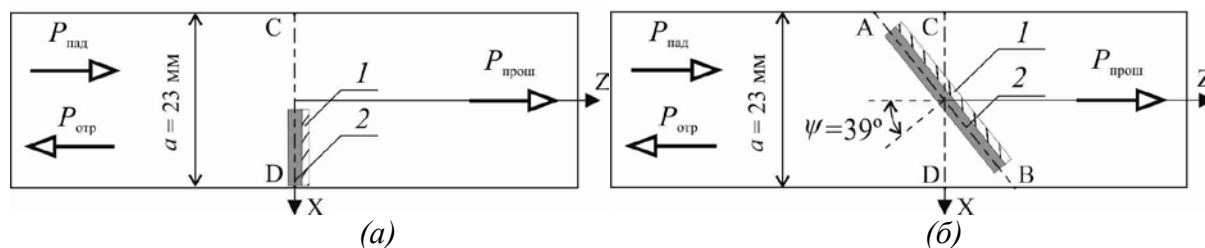


Рис. 1. Расположение исследуемой структуры в волноводе: 1 — TaAlN, 2 — Al₂O₃.

$P_{\text{пад}}$ —падающая мощность, $P_{\text{прош}}$ —прошедшая мощность, $P_{\text{отр}}$ —отраженная мощность.

Результаты расчета частотных зависимостей квадратов модулей коэффициентов прохождения электромагнитного излучения ($|D|^2$) в случае частичного заполнения волновода металлодиэлектрической структурой (см. рис.1 *a*) при различных значениях толщины t нанометровой металлической пленки представлены на рис. 2.

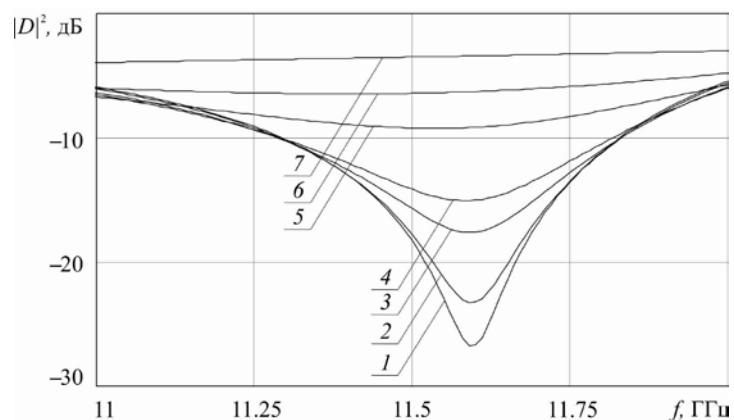


Рис. 2. Расчетные частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой: 1 - пластина поликора без металлической пленки, 2 - $t = 1$ нм, 3 - $t = 3$ нм, 4 - $t = 4$ нм, 5 - $t = 7$ нм, 6 - $t = 13.5$ нм, 7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

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.

На рис. 3 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 дБ до -23.3 дБ. В этом диапазоне толщин расчетная чувствительность $d(|D|^2)/dt$ достигает 3.4 дБ/нм.

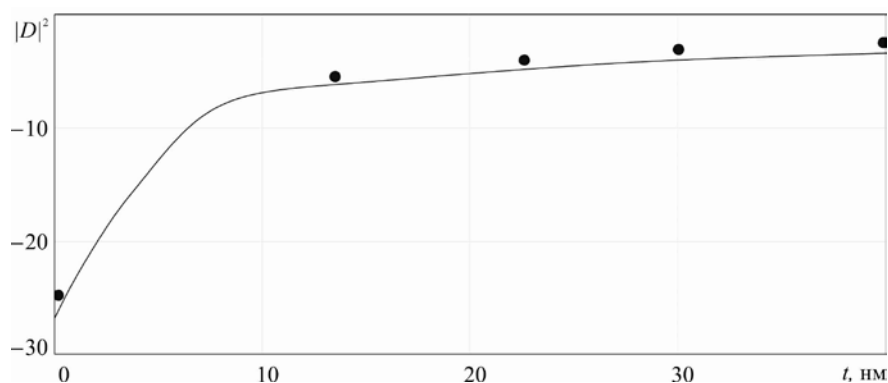


Рис. 3. Расчетная (линия) и экспериментальная (точки) зависимости квадрата модуля коэффициента прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой, от толщины металлической пленки на фиксированной частоте $f=11.6$ ГГц.

Экспериментальные значения $|D|^2$ на той же частоте $f=11.6$ ГГц при геометрических размерах и электрофизических параметрах металлодиэлектрической структуры, соответствующих используемым при численном моделировании, представлены на рис. 3.

При размещении диэлектрической пластины перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода (см. рис.1 б), на частотных зависимостях коэффициентов прохождения электромагнитной волны наблюдаются пики прохождения и ослабления. Характерные частоты этих пиков определяются геометрическими размерами и электрофизическими параметрами диэлектрической пластины, и углом её поворота ψ относительно продольной оси волновода.

Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик исследуемой структуры при различных значениях толщины и удельной электропроводности нанометрового металлического слоя было проведено при помощи системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS (см. рис.4).

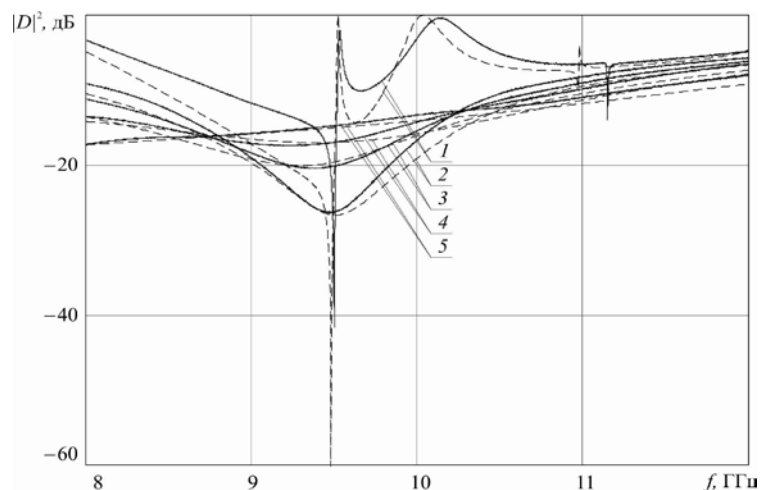


Рис. 4. Расчетные (штриховые линии) и экспериментальные (сплошные линии) частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой: 1 – пластина поликора без металлического слоя; 2 - $t = 13.5$ нм, $\sigma = 1.38 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$; 3 - $t = 22.6$ нм, $\sigma = 1.4 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$; 4 - $t = 30$ нм, $\sigma = 1.658 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$; 5 - $t = 40$ нм, $\sigma = 2.638 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

Результаты компьютерного моделирования демонстрируют наличие на частотной зависимости квадрата модуля коэффициента прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с пластиной поликора. двух пиков прохождения на частотах 9.52 ГГц и 10.03 ГГц и двух пиков ослабления на частотах 9.48 ГГц и 9.62 ГГц. Величины пиков ослабления составляют -60.1 дБ и -14.3 дБ, соответственно.

На рис. 5 представлены результаты расчета распределения напряженности поля на частоте, соответствующей пику прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с пластиной поликора (вдоль широкой стороны поликоровой пластины, вдоль линии АВ).

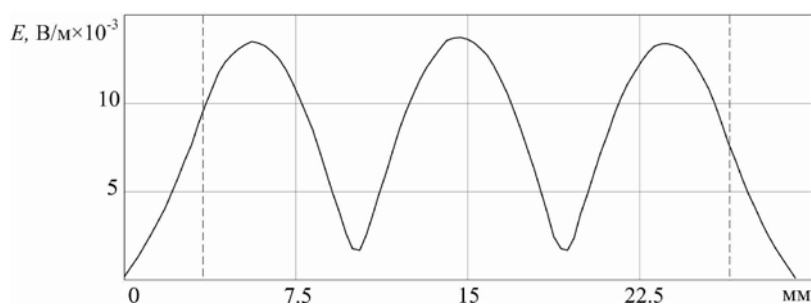


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля E электромагнитной волны на частоте 10.03 ГГц, при расположении пластины поликора перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода вдоль анализируемой линии АВ.

Штриховыми линиями на рис. 5 обозначены границы области, занимаемой исследуемой структурой вдоль анализируемой линии АВ.

Как следует из результатов расчета на частоте, соответствующей пику прохождения, возникает распределение поля, соответствующее стоячей волне с тремя пучностями и четырьмя узлами. Поскольку в поперечном сечении волновод оказывается частично заполненным по широкой стенке, то распределение поля в поперечном сечении волновода вдоль линии CD существенно отличается от распределения, характерного для волны основного типа H_{10} . Распределение поля в продольном сечении волновода, проходящем посередине широкой стенки волновода, характеризуется резким нарастанием напряженности в центральном сечении образца и её спадом на его границах. Из результатов расчета также следует, что на частоте, соответствующей пику пропускания, вне образца реализуется режим бегущей волны.

Как следует из результатов компьютерного моделирования, нанесение даже сверхтонкой металлической пленки ($t = 1.0$ нм, $\sigma = 8.0 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$) приводит к исчезновению пика прохождения на частоте 9.52 ГГц. При нанесении металлической пленки толщиной более $t = 2.0$ нм и электропроводностью более $\sigma = 2.4 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ исчезает пик прохождения и на частоте 10.03 ГГц.

При нанесении тонкой металлической пленки ($t = 1.0$ нм, $\sigma = 8.0 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$) величина пика ослабления на частоте 9.48 ГГц уменьшается до -23.3 дБ, при этом пик ослабления на частоте 9.62 ГГц трансформируется в область перегиба. В этом диапазоне толщин расчетная чувствительность $d(|D|^2)/dt$ достигает 36.8 дБ/нм.

Как следует из результатов расчета на частоте $f=9.63$ ГГц в диапазоне толщин $0 \div 7$ нм расчетная чувствительность $d(|D|^2)/dt$ квадрата модуля коэффициента прохождения к изменению толщины металлического слоя составляет 4.6 дБ/нм.

Экспериментальные частотные зависимости коэффициентов прохождения $|D|^2(f)$ электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой, характеристики которой соответствовали используемым при численном моделировании представлены на рис. 4 в виде сплошных линий.

Для двух рассмотренных способов размещения исследуемой структуры в волноводе сравнение результатов расчета с экспериментальными данными свидетельствует об их хорошем количественном совпадении.

Полученные расчетные и экспериментальные данные свидетельствуют о возможности использования волноводно-диэлектрического резонанса для контроля параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку.

Теоретически обоснованная чувствительность коэффициента прохождения к вариации толщины при использовании волноводно-диэлектрического резонанса более чем на порядок превышает чувствительность СВЧ-метода измерения нанометровых металлических слоев, основанного на использовании СВЧ фотонных кристаллов с нарушением периодичности, в качестве которого выступает измеряемая структура [4, 5]

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

Библиографический список

1. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Эффекты ближнего поля в электродинамических системах с неоднородностями и их использование в технике СВЧ. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2011. 392 с.
2. Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Рудь Л.А. Резонансное рассеяние волн. Т.2

- Волноводные неоднородности. – Киев: Наукова Думка, 1986. 216 с.

3. Занин В. И., Усанов Д. А., Феклистов В. Б. Определение электрофизических параметров полупроводника волноводным резонансным методом// Межвузовский сборник научных статей "Электродинамика слоисто-неоднородных структур СВЧ". Самара: Изд-во Самар. ун-та, 1995. С. 88–99.

4. 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// Доклады Академии Наук. Т. 448, № 1, Январь 2013. С. 35-37.

5. 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, том. 61. № 1. С. 45–53.