

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев

Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов

Учебное пособие для студентов факультета nano- и биомедицинских
технологий, обучающихся по магистерской программе «Электроника и
наноэлектроника»

Лабораторные работы

Саратов 2014

Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В.

Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов: Учеб. Пособие для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий, обучающихся по магистерской программе «Электроника и наноэлектроника» –Саратов, 2014. –32 с.: ил. Электронное издание.

Представлены лабораторные работы, демонстрирующие возможности применения одномерных волноводных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона для измерения параметров тонких нанометровых полупроводниковых и металлических слоев, играющих роль нарушения их периодичности. Для выполнения лабораторных работ студентам предлагается краткое теоретическое описание, алгоритмы расчета искомых физических величин и техническое описание процедуры работы с измерительным оборудованием.

Для студентов университета, обучающихся по направлению 210100 «Электроника и наноэлектроника», магистерская программа «Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии», а также научных сотрудников, аспирантов, инженеров, интересующихся современными аспектами практического применения фотонных кристаллов.

Рекомендует к печати:

Кафедра физики твёрдого тела

Саратовского государственного университета

© Усанов Д.А., Скрипаль А.В.,

Пономарев Д.В.

2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 ОДНОВРЕМЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ТОЛЩИНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ	5
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТОНКИХ НАНОМЕТРОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ	20

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одной из наиболее интенсивно развивающихся областей науки является направление по созданию и исследованию свойств метаматериалов, представляющих собой искусственно созданные гетерогенные среды, в которых геометрические размеры и электрофизические параметры специально подобранных составляющих элементов периодически изменяются вдоль одного или нескольких пространственных направлений. К метаматериалам относится класс фотонных кристаллов – искусственных периодических структур с периодом, сравнимым с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. По аналогии с реальными кристаллами, в фотонных кристаллах существуют разрешенные и запрещенные для распространения электромагнитного излучения частотные области.

Уникальные свойства фотонных кристаллов, обусловленные резонансным взаимодействием электромагнитной волны с периодической структурой, позволяют создавать на их основе новые типы структур и устройств с управляемыми параметрами, а также реализовать новые высокочувствительные методы измерения параметров материалов.

Представленные в данном пособии лабораторные работы направлены на ознакомление студентов с современными методами определения электрофизических параметров материалов с использованием фотонных кристаллов СВЧ-диапзона.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОДНОВРЕМЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ТОЛЩИНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

В настоящее время разработано большое число методов для определения электрофизических параметров веществ в СВЧ-диапазоне. Особую роль эти методы измерения играют при исследовании материалов и структур, используемых при создании приборов СВЧ электроники, так как информация, полученная с помощью низкочастотных методов, при переходе в СВЧ - диапазон может оказаться недостаточной для конструирования СВЧ устройств с заданными характеристиками.

С помощью СВЧ - методов измерения могут быть определены удельная проводимость, диэлектрическая и магнитная проницаемость материала, время жизни, подвижность, эффективная масса носителей заряда, скорость поверхностной рекомбинации, толщина слоев и другие параметры. При этом оказывается возможным проводить неразрушающее измерение нескольких параметров на одной установке с использованием одного образца.

Для одновременного определения электропроводности и толщины полупроводниковых слоев из решения обратной задачи, которое осложнено существованием различных сочетаний значений указанных параметров, при которых наблюдается одинаковые частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения СВЧ – излучения, можно использовать результаты измерений спектров отражения и прохождения СВЧ – излучения, взаимодействующего с электродинамическими структурами, частотные характеристики которых обладают высокой чувствительностью к изменению данных параметров. В качестве такого рода структур могут применяться одномерные фотонные кристаллы СВЧ-диапазона.

Целью работы является ознакомление с методикой одновременного определения электропроводности и толщины полупроводниковых слоев по

спектрам отражения и прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с одномерным волноводным фотонным кристаллом, содержащим исследуемые слои в качестве нарушения периодичности. Предлагается экспериментально определить электропроводность и толщину кремниевой полупроводниковой пластины в трехсантиметровом диапазоне длин волн.

1. Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона

Фотонные кристаллы представляют собой искусственно созданные периодические структуры с периодом, сравнимым с длиной распространяющегося в них электромагнитного излучения. В таких структурах создается периодическое изменение как диэлектрической проницаемости слоев, так и их геометрических размеров. В спектрах отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с такими структурами, наблюдается ярко выраженное чередование разрешенных и запрещенных для распространения электромагнитного излучения частотных диапазонов. По аналогии с реальными кристаллами, частотная область, в которой запрещено распространение электромагнитной волны, получила название фотонной запрещенной зоны (рис.1). При появлении нарушения периодичности в структуре фотонного кристалла, которое может быть реализовано посредством изменения геометрических размеров и/или электрофизических параметров одного или нескольких слоев, в запрещенной зоне фотонного кристалла возникает резонансная особенность – узкое «окно прозрачности», представляющее собой частотную область с минимальным значением коэффициента отражения электромагнитной волны. Положение и форма «окна прозрачности» определяется размерами и электрофизическими параметрами создаваемого нарушения периодичности, что может служить основой для создания методов определения параметров материалов, играющих роль такого рода нарушения.

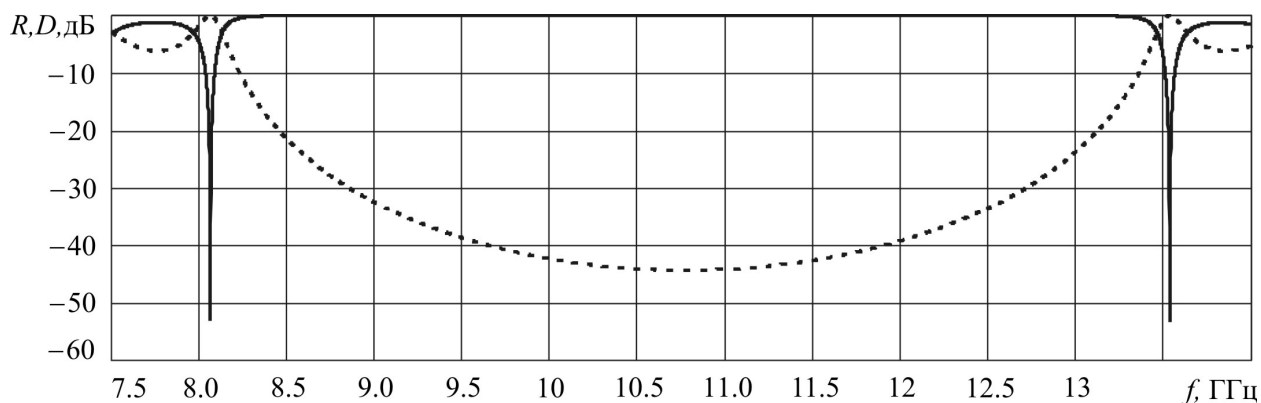


Рис. 1 Запрещенная зона одномерного волноводного фотонного кристалла трехсантиметрового диапазона длин волн.

С точки зрения возможности аналитического описания взаимодействия электромагнитной волны с периодической структурой и технологичности создания периодической электродинамической системы, особый интерес для исследования представляют одномерные фотонные кристаллы, образованные простым чередованием слоев с различной толщиной и электрофизическими параметрами вдоль одного пространственного направления.

Физические особенности взаимодействия электромагнитного излучения с периодической структурой фотонного кристалла носят схожий характер для различных частотных диапазонов, но в то же время СВЧ фотонные кристаллы обладают рядом важных преимуществ: технологичность изготовления периодических структур; хорошее совпадение численного расчета с экспериментом; возможность модификации структуры фотонного кристалла в силу того, что его составные части имеют макроскопические размеры; конструктивно фотонный кристалл может быть создан на основе стандартных элементов СВЧ-схем. Создание периодических фотонных структур СВЧ-диапазона и исследование их свойств имеют важное практическое значение в виду стремительного развития современных систем связи и телекоммуникации, антенн и радарной техники, измерительного оборудования и различного рода датчиков, а результаты исследований особенностей взаимодействия СВЧ-излучения с фотонным кристаллом могут

быть использованы для создания структур, работающих в более высокочастотных диапазонах.

Периодические фотонные структуры СВЧ-диапазона могут быть созданы на основе волноводов и планарных линий передачи. В первом случае фотонный кристалл, например, состоящий из периодически чередующихся слоев различных веществ или матрицы элементов различной формы и свойств, упорядоченных в двух или трех пространственных направлениях, помещается внутрь волноводного тракта, где он облучается СВЧ-излучением. Ко второму типу относятся фотонные кристаллы, выполненные в виде полосковых линий передачи различных типов с периодическим изменением топологии, геометрических размеров линии передачи и диэлектрической проницаемости подложки, которые подключаются к внешней СВЧ-цепи. Также возможно создание периодической структуры, независимой от волноведущего тракта или линии передачи, исследование которой проводится при помощи волн, распространяющихся в свободном пространстве.

2. Математическая модель фотонного кристалла

Для расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны при её нормальном падении на многослойную структуру с плоскостями слоёв, перпендикулярными направлению распространения излучения и полностью заполняющими волновод по поперечному сечению (Рис.), воспользуемся матрицей передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны γ_j и γ_{j+1} .

Для расчета постоянных распространения $\gamma_0, \gamma_d, \gamma_m, \gamma_p$ электромагнитной волны соответственно в пустом волноводе, волноводе, заполненном диэлектриком, металлической пленкой и полупроводником, использовались следующие выражения:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0}, \quad \gamma_{п,м} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_{п,м}^* \varepsilon_0 \mu_{п,м} \mu_0}, \quad \gamma_d = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_d \varepsilon_0 \mu_0},$$

где $\varepsilon_{п,м}^* = \varepsilon'_{п,м} - j\varepsilon''_{п,м}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость полупроводникового слоя и тонкой металлической пленки, $\varepsilon'_{п,м} = \varepsilon_{п,м} - \frac{\sigma_{п,м}^2 m_{п,м}^*}{\varepsilon_0 e^2 n_{п,м}}$, $\varepsilon''_{п,м} = \frac{\sigma_{п,м}}{\varepsilon_0 \omega}$ – действительная и мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости полупроводникового слоя и тонкой металлической пленки, ε_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума, $\varepsilon_{п,м}$ и $\mu_{п,м}$ – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость решетки полупроводниковой подложки и металлического слоя соответственно, $\sigma_{п,м}$ – электропроводность полупроводниковой подложки и металлического слоя, $m_{п,м}^*$, $n_{п,м}$ – эффективная масса и концентрация электронов в полупроводниковой подложке и металлическом слое, ε_d – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического слоя.

Выражения для компонент поля по разные стороны от границы между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны имеют вид:

$$\begin{aligned} E_j &= E(x) (A_j e^{-\gamma_j z} + B_j e^{\gamma_j z}), \\ H_j &= -\gamma_j H(x) (A_j e^{-\gamma_j z} - B_j e^{\gamma_j z}), \\ E_{j+1} &= E(x) (A_{j+1} e^{-\gamma_{j+1} z} + B_{j+1} e^{\gamma_{j+1} z}), \\ H_{j+1} &= -\gamma_{j+1} H(x) (A_{j+1} e^{-\gamma_{j+1} z} - B_{j+1} e^{\gamma_{j+1} z}). \end{aligned} \quad (1)$$

Условия непрерывности компонент поля на границе, находящейся на расстоянии $z_{j,j+1}$ от поверхности структуры, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} A_j e^{-\gamma_j z_{j,j+1}} + B_j e^{\gamma_j z_{j,j+1}} &= A_{j+1} e^{-\gamma_{j+1} z_{j,j+1}} + B_{j+1} e^{\gamma_{j+1} z_{j,j+1}}, \\ -\gamma_j A_j e^{-\gamma_j z_{j,j+1}} + \gamma_j B_j e^{\gamma_j z_{j,j+1}} &= -\gamma_{j+1} A_{j+1} e^{-\gamma_{j+1} z_{j,j+1}} + \gamma_{j+1} B_{j+1} e^{\gamma_{j+1} z_{j,j+1}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Умножим первое уравнение системы (2) на γ_{j+1} , а затем просуммируем эти уравнения и вычтем первое уравнение из второго, тогда получим:

$$\begin{aligned} A_j(\gamma_{j+1} - \gamma_j)e^{-\gamma_j z_{j,j+1}} + B_j(\gamma_{j+1} + \gamma_j)e^{\gamma_j z_{j,j+1}} &= 2B_{j+1}\gamma_{j+1}e^{\gamma_{j+1} z_{j,j+1}} \\ A_j(\gamma_{j+1} + \gamma_j)e^{-\gamma_j z_{j,j+1}} + B_j(\gamma_{j+1} - \gamma_j)e^{\gamma_j z_{j,j+1}} &= 2A_{j+1}\gamma_{j+1}e^{-\gamma_{j+1} z_{j,j+1}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Выразив из этой системы уравнений коэффициенты A_{j+1} и B_{j+1} :

$$\begin{aligned} A_{j+1} &= A_j \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} + B_j \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}}, \\ B_{j+1} &= A_j \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} + B_j \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}}, \end{aligned} \quad (4)$$

можно записать следующее выражение для компонент матрицы передачи:

$$\mathbf{T}(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

которая связывает коэффициенты A_j , B_j и A_{j+1} , B_{j+1} , определяющие амплитуды падающих и отраженных волн по обе стороны от границы $z_{j,j+1}$, соотношением:

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = \mathbf{T}(z_{j,j+1}) \cdot \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Коэффициенты A_{N+1} и B_0 , определяющие амплитуды волны, прошедшей через многослойную структуру (рис.1), и волны, отраженной от нее, связаны с коэффициентом A_0 , определяющим амплитуду падающей волны, следующим соотношением:

$$\begin{pmatrix} A_{N+1} \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_N \cdot \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где

$$\mathbf{T}_N = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_N[1,1] & \mathbf{T}_N[1,2] \\ \mathbf{T}_N[2,1] & \mathbf{T}_N[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 \mathbf{T}_{j,(j+1)} = \mathbf{T}(z_{N,N+1}) \cdot \mathbf{T}(z_{N-1,N}) \dots \mathbf{T}(z_{1,2}) \cdot \mathbf{T}(z_{0,1}) \quad (8)$$

матрица передачи слоистой структуры, состоящей из N слоев (рис. 2).

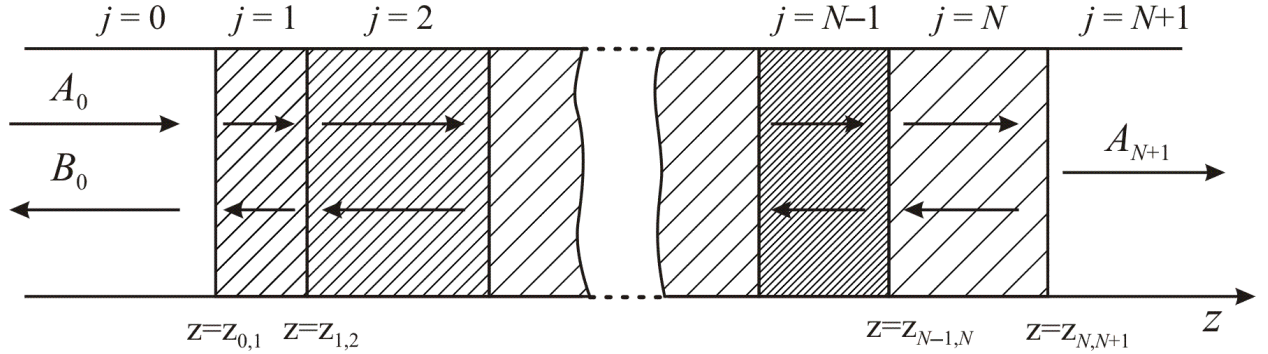


Рис. 2 Слоистая структура, состоящая из N слоев

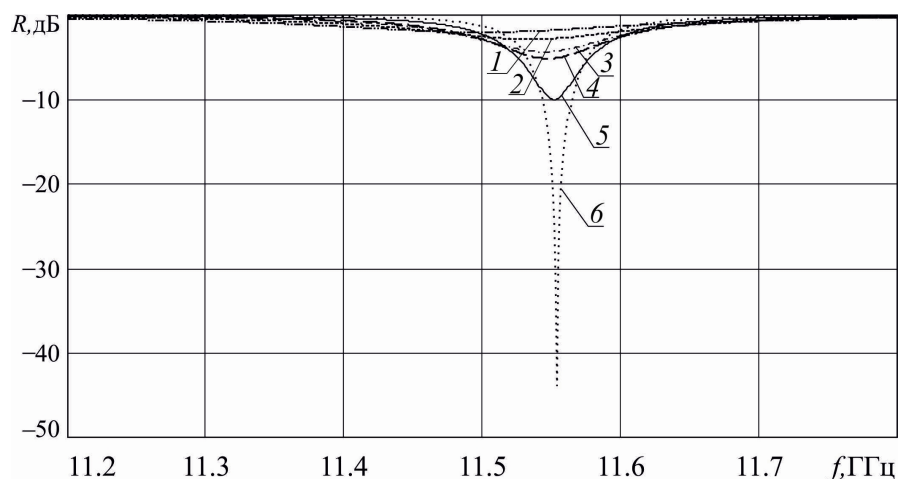
Записывая коэффициенты отражения $R = B_0 / A_0$ и прохождения $T = A_{N+1} / A_0$ через элементы матрицы передачи \mathbf{T}_N , в соответствии с соотношением (7), получим:

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}, \quad (9)$$

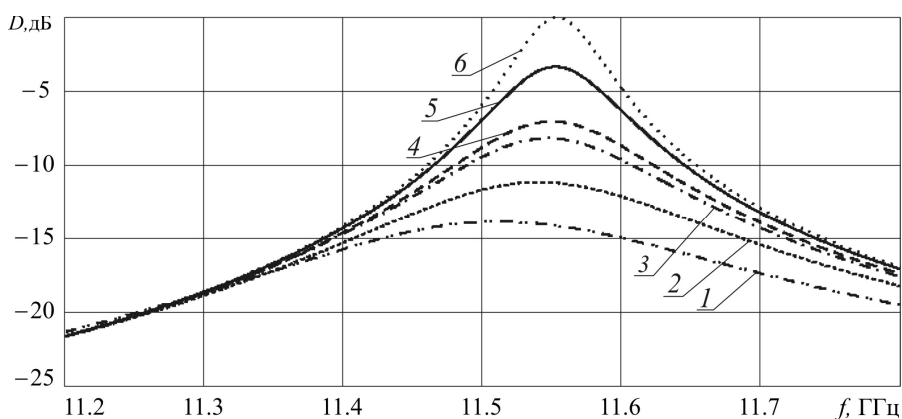
$$D = \frac{\mathbf{T}_N[1,1] \cdot \mathbf{T}_N[2,2] - \mathbf{T}_N[1,2] \cdot \mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}. \quad (10)$$

3. Основы метода измерения

Одномерный волноводный фотонный кристалл представляет собой периодическую структуру, состоящую из N чередующихся слоев материалов с различной диэлектрической проницаемостью. В простейшем случае, это чередование слоев материалов двух типов, например поликора (Al_2O_3 , $\varepsilon = 9,6$) и фторопласта ($\varepsilon = 2$). Нарушение создается посредством изменения длины центрального, слоя, и введением исследуемого полупроводникового слоя между центральным нарушенным и следующим за ним диэлектрическим слоем. Это приводит к появлению «окна прозрачности» в запрещенной зоне фотонного кристалла (рис. 3).



(а)



(б)

Рис. 3 Спектры отражения (а) и прохождения (б) вблизи «окна прозрачности» 11-слойного фотонного кристалла «поликор-фторопласт» с нарушенным центральным слоем толщиной 2 мм, содержащего слой кремния с различными толщиной и электропроводностью: 1 – $t = 30$ мкм, $\sigma = 50 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, 2 – $t = 10$ мкм, $\sigma = 100 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, 3 – $t = 5$ мкм, $\sigma = 120 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, 4 – $t = 3$ мкм, $\sigma = 160 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, 5 – $t = 1$ мкм, $\sigma = 180 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, 6 – без полупроводникового слоя

Для одновременного определения электропроводности и толщины полупроводниковых слоев можно использовать результаты измерений спектров отражения взаимодействующего с ними СВЧ – излучения при условии, что известно их теоретическое описание. При этом нахождение этих параметров связано с необходимостью решать обратную задачу. Решение такого рода задачи в этом случае осложняется тем, что существуют различные сочетания значений указанных параметров, при которых наблюдается одинаковые частотные зависимости коэффициентов отражения

и прохождения СВЧ – излучения. Для устранения такого рода неоднозначности решения предлагается проводить измерения спектров отражения и прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом, при расположении полупроводникового слоя сначала на одном, а потом на другом фиксированном расстоянии от границы нарушенного центрального слоя фотонного кристалла или на одном фиксированном расстоянии от полупроводникового слоя до границы нарушенного центрального слоя фотонного кристалла, но при двух различных длинах слоя с нарушенной периодичностью фотонного кристалла.

Первый способ заключается в проведении измерений при постоянной температуре, но при расположении полупроводникового слоя сначала на одном, а потом на другом фиксированном расстоянии от границы нарушенного центрального слоя фотонного кристалла (рис. 4). В этом случае для нахождения толщины t и электропроводности σ исследуемого образца по частотным зависимостям $D_{1,2}(f)$ и $R_{1,2}(f)$ используется метод наименьших квадратов, при реализации которого находится такое значение параметров $t_{иск}$ и $\sigma_{иск}$, при котором сумма $S(t_{иск}, \sigma_{иск})$ квадратов разностей расчетных и экспериментальных значений коэффициентов прохождения и отражения, измеренных при двух различных фиксированных расстояниях от полупроводникового слоя до границы нарушенного центрального слоя фотонного кристалла,

$$S(t, \sigma) = \sum \left((D_1(f, t, \sigma) - D_{1эксп}) + (R_1(f, t, \sigma) - R_{1эксп}) + (D_2(f, t, \sigma) - D_{2эксп}) + (R_2(f, t, \sigma) - R_{2эксп}) \right)^2 \quad (11)$$

становится минимальной.

Здесь $R_{1,2}(f, t, \sigma), D_{1,2}(f, t, \sigma)$, и $R_{1,2эксп}, D_{1,2эксп}$ – рассчитанные и экспериментальные частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения СВЧ-излучения, индексы 1 и 2 соответствуют двум расстояниям между измеряемым полупроводниковым слоем и границей нарушенного центрального слоя при расположении полупроводникового

слоя внутри нарушенного центрального слоя, σ — электропроводность полупроводникового слоя, t — толщина полупроводникового слоя, f — частота. С помощью ЭВМ находятся значения толщины и электропроводности, при которых теоретические частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, полученные при двух расстояниях от границы нарушенного центрального слоя до исследуемого полупроводникового слоя, наиболее близки к измеренным в этих положениях из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial S(\sigma)}{\partial \sigma} = 0, \\ \frac{\partial S(t)}{\partial t} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

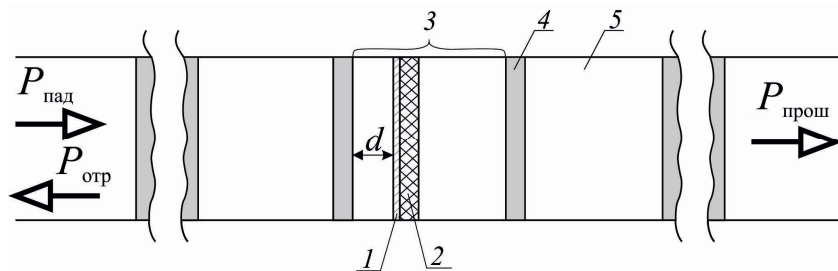


Рис. 4. Структура одномерного волноводного СВЧ фотонного кристалла: 1 — измеряемый тонкий полупроводниковый слой, 2 — высокоомная подложка, 3 — нарушенный центральный воздушный слой, 4 — слой поликора (Al_2O_3), 5 — слой воздуха,

Функция невязок $s(t, \sigma)$, определяемая выражением вида (11), должна обладать ярко выраженным глобальным минимумом в пространстве координат $(t, \sigma, S(t, \sigma))$, что позволяет однозначно определять толщину и электропроводность сильно легированного полупроводникового слоя из решения системы уравнений (12).

Второй способ заключается в проведении измерений при постоянной температуре и на одном фиксированном расстоянии от полупроводникового слоя до границы нарушенного центрального слоя фотонного кристалла, но при двух различных длинах слоя с нарушенной периодичностью фотонного

кристалла (рис. 5). В этом случае для нахождения толщины t и электропроводности σ исследуемого образца по частотным зависимостям $D(f)$ и $R(f)$ используется метод наименьших квадратов, при реализации которого находится такое значение параметров $t_{иск}$ и $\sigma_{иск}$, при котором сумма $S(t_{иск}, \sigma_{иск})$ квадратов разностей расчетных и экспериментальных значений коэффициентов пропускания и отражения, измеренных при двух различных значениях толщины центрального нарушенного слоя фотонного кристалла, вида (11) становится минимальной. В этом случае индексы 1 и 2 соответствуют двум длинам нарушенного центрального слоя фотонного кристалла при расположении полупроводникового слоя внутри нарушенного центрального слоя.. С помощью ЭВМ находят значения толщины и электропроводности, при которых теоретические частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, полученные при двух длинах нарушенного центрального слоя фотонного кристалла, наиболее близки к измеренным при этих длинах из решения системы уравнений вида (12).

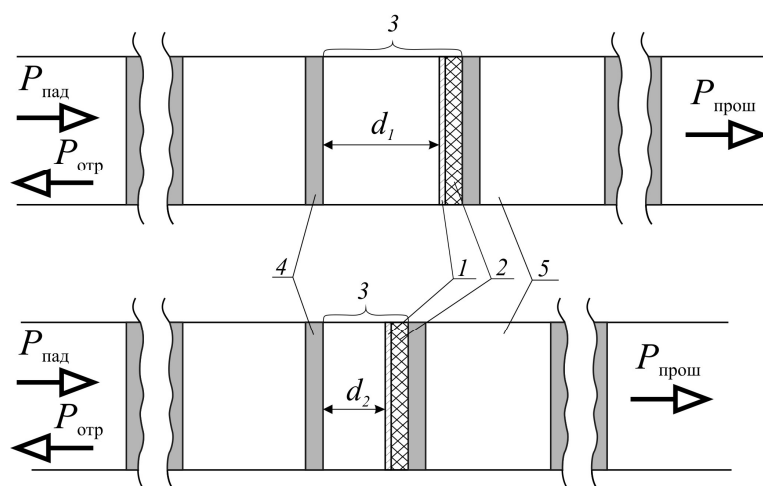


Рис. 5. Структура одномерного волноводного СВЧ фотонного кристалла: 1 — измеряемый тонкий полупроводниковый слой, 2 — высокоомная подложка, 3 — нарушенный центральный воздушный слой, 4 — слой поликора (Al_2O_3), 5 — слой воздуха

С точки зрения проведения экспериментальных измерений более предпочтительным является метод с изменением длины центрального слоя фотонного кристалла. В ходе проведения модельного эксперимента для определения максимальной разрешающей способности метода полупроводникового слоя в исследуемой структуре получены значения толщин порядка 100 нм при удельной электропроводности $1000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с измерительной установкой в составе векторного анализатора цепей Agilent PNA-L N5230A 10 МГц – 40 ГГц, двух коаксиальных кабелей, двух коаксиально-волноводных переходников и измерительного волноводного тракта.
2. Подсоединить коаксиальные кабели к анализатору цепей, подсоединить коаксиально-волноводные переходники к коаксиальным кабелям. К правому коаксиально-волноводному переходнику подсоединить волноводную секцию со съемной крышкой. Левый коаксиально-волноводный переходник обозначается как **Port 1**, правый с присоединенной к нему волноводной секцией – **Port 2**.
3. Выбрать частотный диапазон на передней панели. **Start/Center-F1**– установить частоту низкочастотной границы диапазона 8.2 ГГц последовательностью **8.2-G/n-Enter**. **Start/Center-F2**– установить частоту высокочастотной границы диапазона 12.4 ГГц последовательностью **12.4-G/n-Enter**.
4. Провести калибровку измерительной установки по следующей схеме
 1. Меню **Calibration-Calibration Wizard-SmartCal-2 Port Cal**– в обоих выпадающих списках с левой стороны выбрать **X-band waveguide**, в выпадающих списках с правой стороны будет указан номер соответствующего калибровочного набора **X11644A**

2. Меню **Calibration–Calibration Wizard–SmartCal–2 Port Cal–** в обоих выпадающих списках с левой стороны выбрать **X-band waveguide**, в выпадающих списках с правой стороны будет указан номер соответствующего калибровочного набора **X11644A**
 3. Подсоединить короткозамыкатель из калибровочного набора к **Port 1**–нажать кнопку **Measure–Next**
 4. Подсоединить короткозамыкатель из калибровочного набора к **Port 2**– нажать кнопку **Measure–Next**
 5. Подсоединить **Port 1** к **Port 2**–нажать кнопку **Measure–Next**
 6. Вставить между **Port 1** и **Port 2** четвертьволновую пластину из калибровочного набора–нажать кнопку **Measure–Next**
 7. Нажать кнопку **Save as User Calset**, записать название калибровочного файла, нажать кнопку **Save**.
5. Выключить СВЧ-мощность нажатием кнопки **Power–F2**. Отсоединить четвертьволновую пластину и подсоединить **Port 1** к **Port 2**.
 6. Снять крышку волноводной секции и собрать внутри нее 11-слойный фотонный кристалл. Нечетные слои – из поликора (Al_2O_3) толщиной 1 мм, четные – из фторопласта толщиной 7 мм. Установить крышку волноводной секции, включить СВЧ-мощность нажатием кнопки **Power–F2**, записать спектры отражения и прохождения СВЧ-излучения через меню **File–Save As**. Тип файла–**s2p**. Пронаблюдать наличие фотонной запрещенной зоны.
 7. Создать нарушение периодичности в виде изменения толщины центрального слоя до 3 мм. Измерить соответствующие спектры отражения и прохождения СВЧ-излучения. Пронаблюдать появления «окна прозрачности» в фотонной запрещенной зоне.
 8. Дополнительно поместить в нарушенный слой (3 мм) фотонного кристалла слой полупроводника (кремний, $\epsilon=11,6$). Измерить соответствующие спектры отражения и прохождения СВЧ-излучения.

Пронаблюдать изменение частотного положения и формы «окна прозрачности» в фотонной запрещенной зоне.

9. Создать нарушение периодичности в виде изменения толщины центрального слоя до 4 мм. Измерить соответствующие спектры отражения и прохождения СВЧ-излучения. Пронаблюдать появления «окна прозрачности» в фотонной запрещенной зоне.
10. Дополнительно поместить в нарушенный слой (4 мм) фотонного кристалла слой полупроводника (кремний, $\varepsilon = 11,6$). Измерить соответствующие спектры отражения и прохождения СВЧ-излучения. Пронаблюдать изменение частотного положения и формы «окна прозрачности» в фотонной запрещенной зоне.
11. Получить одновременно значения толщины и электропроводности из решения двухпараметровой обратной задачи, воспользовавшись алгоритмом расчета, представленном в теоретическом описании к данной лабораторной работе.

Контрольные вопросы

Предварительное собеседование

1. Физические свойства фотонных кристаллов
2. Особенности фотонных кристаллов СВЧ-диапазона, преимущества, области применения
3. Использование фотонных кристаллов в качестве элемента измерительной системы
4. Проблема одновременного определения толщины и электропроводности полупроводниковых слоев
5. Теоретическое описание взаимодействия СВЧ-волны с одномерным волноводным фотонным кристаллом
6. Методы одновременного определения толщины и электропроводности полупроводниковых слоев с использованием СВЧ фотонных кристаллов
7. Особенности решения обратной задачи

Окончательное собеседование

1. Методы определения толщин полупроводниковых слоев
2. Методы определения электропроводности полупроводниковых слоев
3. Описание измерительной установки, процесса калибровки и измерений
4. Обоснование выбора геометрической конфигурации и параметров слоев одномерного волноводного фотонного кристалла.
5. Анализ экспериментально полученных спектров отражения и прохождения СВЧ-излучения и результатов расчета толщины и электропроводности полупроводниковых слоев.

Литература

Основная:

- 1 Гуляев Ю.В., Никитов С.А. Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации// Радиотехника. 2003. №8. С. 26–30.
- 2 Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев Способ определения электропроводности и толщины полупроводниковых пластин или нанометровых полупроводниковых слоев в структурах «полупроводниковый слой–полупроводниковая подложка». Патент РФ 2517200 С2 МПК G01N 22/00. Оpubл. 27.05.2014. Бюл. 15.

Дополнительная:

- 1 Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Постельга А.Э., Пономарев Д.В. Определение параметров тонких полупроводниковых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов// Доклады Академии Наук. Т. 443, № 5, Апрель 2012., С. 564-566.
- 2 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics// Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58, no. 20. pp. 2059—2062.
- 3 Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. Donor and acceptor modes in photonic band structure// Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67, no. 24. pp. 3380–3383.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТОНКИХ НАНОМЕТРОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

СВЧ - методы измерения параметров материалов обладают рядом важных преимуществ: они являются бесконтактными методами, позволяют проводить исследование в широком температурном интервале, дают возможность изучения анизотропных полупроводниковых материалов, порошкообразных материалов и образцов произвольной формы, позволяют изучать эффекты в сильных полях и явления резонансного взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. Недостатками СВЧ - методов измерения, препятствующими их широкому применению в производстве и в научных исследованиях, являются необходимость в сложной и дорогостоящей регистрирующей аппаратуре и невозможность в большинстве случаев получить простые и точные соотношения, связывающие измеряемые параметры образца материала с характеристиками СВЧ – колебаний.

Применение СВЧ фотонных кристаллов в качестве основного элемента измерительной системы позволяет реализовать новые типы методов измерения электрофизических параметров материалов в СВЧ-диапазоне. В основе таких методов лежит явление частотного сдвига «окна прозрачности» в запрещенной зоне фотонного кристалла при изменении параметров нарушения его периодичности. К настоящему времени разработан ряд успешных методик по определению комплексной диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков и композитов, жидких диэлектриков и их растворов, электропроводности или толщины тонких нанометровых металлических пленок.

Для решения практически важной однопараметровой задачи по измерению электропроводности или толщины тонких нанометровых пленок, при соответственно известных толщине или электропроводности, а также

расширения диапазона измеряемых величин, можно использовать одномерный волноводный фотонный кристалл. Периодическая структура, содержащая нарушение, вызывающее появление чувствительного «окна прозрачности» в фотонной запрещенной зоне, располагается перед нанометровым металлическим слоем, напыленным на диэлектрическую подложку, и выполняет роль дополнительного резонатора.

Целью работы является ознакомление с методикой определения электропроводности тонких нанометровых металлических слоев по спектрам отражения и прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с одномерным волноводным фотонным кристаллом, содержащим исследуемые слои. Предлагается экспериментально определить электропроводность нанометрового металлического слоя, напыленного на диэлектрическую пластину, в трехсантиметровом диапазоне длин волн.

2. Математическая модель фотонного кристалла

Для расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны при её нормальном падении на многослойную структуру с плоскостями слоёв, перпендикулярными направлению распространения излучения и полностью заполняющими волновод по поперечному сечению (Рис.), воспользуемся матрицей передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны γ_j и γ_{j+1} .

Для расчета постоянных распространения $\gamma_0, \gamma_d, \gamma_m, \gamma_p$ электромагнитной волны соответственно в пустом волноводе, волноводе, заполненном диэлектриком, металлической пленкой и полупроводником, использовались следующие выражения:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0}, \quad \gamma_{п,м} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_{п,м}^* \varepsilon_0 \mu_{п,м} \mu_0}, \quad \gamma_d = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_d \varepsilon_0 \mu_0},$$

где $\varepsilon_{п,м}^* = \varepsilon_{п,м}' - j\varepsilon_{п,м}''$ – комплексная диэлектрическая проницаемость полупроводникового слоя и тонкой металлической пленки,

$$\varepsilon'_{п,м} = \varepsilon_{п,м} - \frac{\sigma_{п,м}^2 m_{п,м}^*}{\varepsilon_0 e^2 n_{п,м}}, \quad \varepsilon''_{п,м} = \frac{\sigma_{п,м}}{\varepsilon_0 \omega} - \text{действительная и мнимая часть комплексной}$$

диэлектрической проницаемости полупроводникового слоя и тонкой металлической пленки, ε_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума, $\varepsilon_{п,м}$ и $\mu_{п,м}$ относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость решетки полупроводниковой подложки и металлического слоя соответственно, $\sigma_{п,м}$ – электропроводность полупроводниковой подложки и металлического слоя, $m_{п,м}^*$, $n_{п,м}$ – эффективная масса и концентрация электронов в полупроводниковой подложке и металлическом слое, ε_d – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического слоя.

Выражения для компонент поля по разные стороны от границы между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны имеют вид:

$$\begin{aligned} E_j &= E(x) (A_j e^{-\gamma_j z} + B_j e^{\gamma_j z}), \\ H_j &= -\gamma_j H(x) (A_j e^{-\gamma_j z} - B_j e^{\gamma_j z}), \\ E_{j+1} &= E(x) (A_{j+1} e^{-\gamma_{j+1} z} + B_{j+1} e^{\gamma_{j+1} z}), \\ H_{j+1} &= -\gamma_{j+1} H(x) (A_{j+1} e^{-\gamma_{j+1} z} - B_{j+1} e^{\gamma_{j+1} z}). \end{aligned} \quad (1)$$

Условия непрерывности компонент поля на границе, находящейся на расстоянии $z_{j,j+1}$ от поверхности структуры, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} A_j e^{-\gamma_j z_{j,j+1}} + B_j e^{\gamma_j z_{j,j+1}} &= A_{j+1} e^{-\gamma_{j+1} z_{j,j+1}} + B_{j+1} e^{\gamma_{j+1} z_{j,j+1}}, \\ -\gamma_j A_j e^{-\gamma_j z_{j,j+1}} + \gamma_j B_j e^{\gamma_j z_{j,j+1}} &= -\gamma_{j+1} A_{j+1} e^{-\gamma_{j+1} z_{j,j+1}} + \gamma_{j+1} B_{j+1} e^{\gamma_{j+1} z_{j,j+1}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Умножим первое уравнение системы (2) на γ_{j+1} , а затем просуммируем эти уравнения и вычтем первое уравнение из второго, тогда получим:

$$\begin{aligned} A_j (\gamma_{j+1} - \gamma_j) e^{-\gamma_j z_{j,j+1}} + B_j (\gamma_{j+1} + \gamma_j) e^{\gamma_j z_{j,j+1}} &= 2B_{j+1} \gamma_{j+1} e^{\gamma_{j+1} z_{j,j+1}} \\ A_j (\gamma_{j+1} + \gamma_j) e^{-\gamma_j z_{j,j+1}} + B_j (\gamma_{j+1} - \gamma_j) e^{\gamma_j z_{j,j+1}} &= 2A_{j+1} \gamma_{j+1} e^{-\gamma_{j+1} z_{j,j+1}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Выразив из этой системы уравнений коэффициенты A_{j+1} и B_{j+1} :

$$\begin{aligned} A_{j+1} &= A_j \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1}-\gamma_j)z_{j,j+1}} + B_j \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1}+\gamma_j)z_{j,j+1}}, \\ B_{j+1} &= A_j \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1}+\gamma_j)z_{j,j+1}} + B_j \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1}-\gamma_j)z_{j,j+1}} \end{aligned} \quad (4)$$

можно записать следующее выражение для компонент матрицы передачи:

$$\mathbf{T}(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1}-\gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1}+\gamma_j)z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1}+\gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1}-\gamma_j)z_{j,j+1}} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

которая связывает коэффициенты A_j , B_j и A_{j+1} , B_{j+1} , определяющие амплитуды падающих и отраженных волн по обе стороны от границы $z_{j,j+1}$, соотношением:

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = \mathbf{T}(z_{j,j+1}) \cdot \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Коэффициенты A_{N+1} и B_0 , определяющие амплитуды волны, прошедшей через многослойную структуру (рис.1), и волны, отраженной от нее, связаны с коэффициентом A_0 , определяющим амплитуду падающей волны, следующим соотношением:

$$\begin{pmatrix} A_{N+1} \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_N \cdot \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где

$$\mathbf{T}_N = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_N[1,1] & \mathbf{T}_N[1,2] \\ \mathbf{T}_N[2,1] & \mathbf{T}_N[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 \mathbf{T}_{j,(j+1)} = \mathbf{T}(z_{N,N+1}) \cdot \mathbf{T}(z_{N-1,N}) \dots \mathbf{T}(z_{1,2}) \cdot \mathbf{T}(z_{0,1}) \quad (8)$$

матрица передачи слоистой структуры, состоящей из N слоев (рис. Рис.).

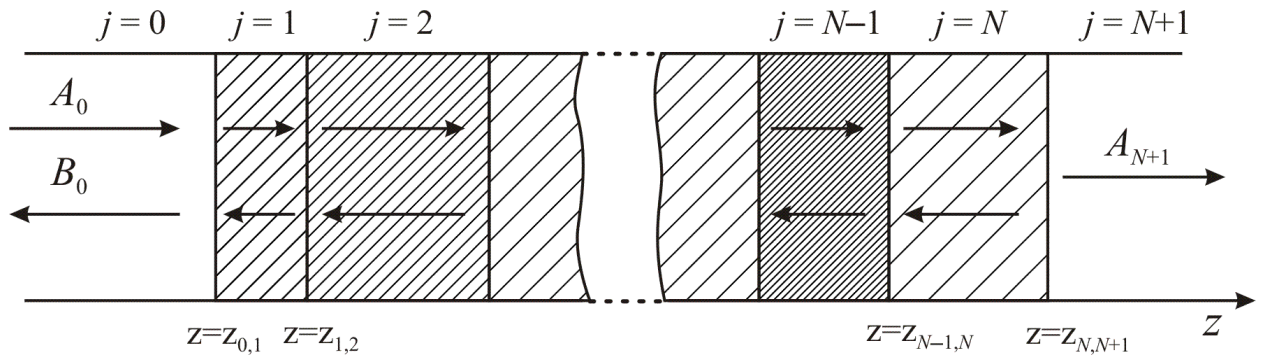


Рис. 1 Слоистая структура, состоящая из N слоев

Записывая коэффициенты отражения $R = B_0 / A_0$ и прохождения $T = A_{N+1} / A_0$ через элементы матрицы передачи \mathbf{T}_N , в соответствии с соотношением (7), получим:

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N [2,1]}{\mathbf{T}_N [2,2]}, \quad (9)$$

$$D = \frac{\mathbf{T}_N [1,1] \cdot \mathbf{T}_N [2,2] - \mathbf{T}_N [1,2] \cdot \mathbf{T}_N [2,1]}{\mathbf{T}_N [2,2]}. \quad (10)$$

3. Основы метода измерения

Одномерные волноводные фотонные кристаллы могут использоваться для определения параметров тонких нанометровых металлических пленок, нанесенных на диэлектрическую или полупроводниковую подложку по частотной зависимости коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонной структурой, содержащей измеряемый образец. Одномерный волноводный фотонный кристалл представляет собой периодическую структуру, состоящую из N чередующихся слоев материалов с различной диэлектрической проницаемостью. В простейшем случае, это чередование слоев материалов двух типов, например поликора (Al_2O_3 , $\varepsilon = 9,6$) и фторопласта ($\varepsilon = 2$). Нарушение создается посредством изменения длины центрального слоя фотонного кристалла. Двухслойная структура помещается за волноводным фотонным кристаллом и непосредственно примыкает к нему (рис. 2). Это приводит к появлению «окна прозрачности» в запрещенной зоне фотонного

кристалла (рис. 3), частотное положение и форма которого зависят от параметров исследуемого нанометрового металлического слоя (рис. 3).

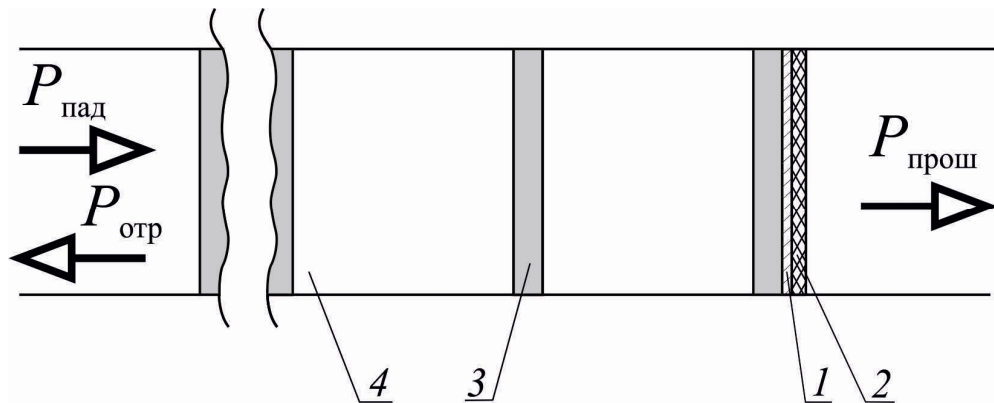


Рис. 4.. Одномерный волноводный СВЧ фотонный кристалл с расположенной непосредственно за ним исследуемой двухслойной структурой в виде нанометровой металлической пленки на диэлектрической подложке.: 1–тонкий слой кремния, 2–высокоомная кремниевая подложка, 3– слой поликора (Al_2O_3), 4– слой фторопласта.

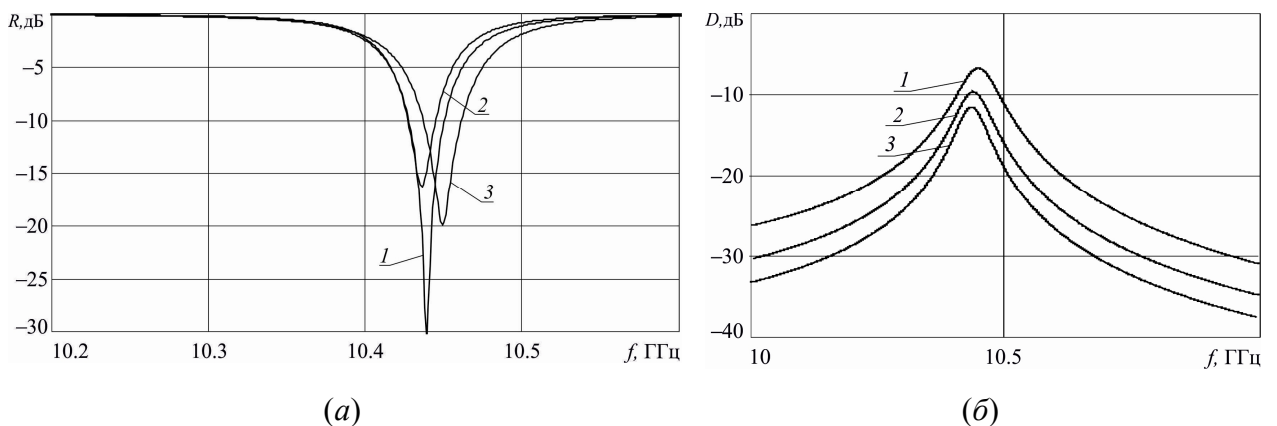


Рис. 3 Спектры отражения (а) и прохождения (б) вблизи «окна прозрачности» 11-слойного фотонного кристалла «поликор-фторопласт» с нарушением периодичности в виде измененной длины центрального слоя равной 3,9 мм и нанометровой металлической пленки, нанесенной на диэлектрическую подложку, расположенную после фотонного кристалла, при различных значениях толщины и электропроводности металлической пленки: 1 – $t = 150$ нм, $\sigma = 0,5 \times 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, 2 – $t = 100$ нм, $\sigma = 2,5 \times 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, 3 – $t = 30$ нм, $\sigma = 5,5 \times 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.

Электропроводность толщина пленки, а также все параметры подложки должны быть известны заранее. Толщины ненометровых металлических пленок могут быть определены различными методами, например, по изгибу

интерференционных полос на границе металл-диэлектрик или зондовыми методами.

Способ заключается в проведении измерений при постоянной температуре и расположении металлической пленки, нанесенной на диэлектрическую или полупроводниковую подложку, за фотонным кристаллом при двух различных длинах центрального нарушенного слоя. В этом случае для нахождения электропроводности σ исследуемого образца при известной толщине по частотным зависимостям $D_{1,2}(f)$ и $R_{1,2}(f)$ используется метод наименьших квадратов, при реализации которого находится такое значение параметра $\sigma_{иск}$, при котором сумма $S(\sigma_{иск})$ квадратов разностей расчетных и экспериментальных значений коэффициентов прохождения и отражения, измеренных при двух различных длинах центрального нарушенного слоя фотонного кристалла,

$$S(\sigma) = \sum \left(\begin{aligned} &(D_1(f, \sigma) - D_{1эксп}) + (R_1(f, \sigma) - R_{1эксп}) + \\ &+ (D_2(f, \sigma) - D_{2эксп}) + (R_2(f, \sigma) - R_{2эксп}) \end{aligned} \right)^2 \quad (11)$$

становится минимальной.

Здесь $R_{1,2}(f, \sigma), D_{1,2}(f, \sigma)$, и $R_{1,2эксп}, D_{1,2эксп}$ – рассчитанные и экспериментальные частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения СВЧ-излучения, индексы 1 и 2 соответствуют двум различным длинам нарушенного центрального слоя, σ — электропроводность металлической пленки, f – частота. С помощью ЭВМ находят значения электропроводности, при которых теоретические частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, полученные при двух различных длинах нарушенного слоя фотонного кристалла, наиболее близки к измеренным в этих положениях из решения уравнения следующего вида:

$$\frac{\partial S(\sigma)}{\partial \sigma} = 0. \quad (12)$$

Аналогично, при известной электропроводности пленки может быть определена её толщина из решения уравнения:

$$\frac{\partial S(t)}{\partial \sigma t} = \frac{\partial \Sigma \left(\begin{array}{l} (D_1(f,t) - D_{1\text{ЭКСП}}) + (R_1(f,t) - R_{1\text{ЭКСП}}) + \\ + (D_2(f,t) - D_{2\text{ЭКСП}}) + (R_2(f,t) - R_{2\text{ЭКСП}}) \end{array} \right)^2}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

Функция невязок $S(t, \sigma)$, определяемая выражением вида (11), должна обладать ярко выраженным глобальным минимумом в плоскости координат $(\sigma, S(\sigma))$, что позволяет однозначно определять электропроводность нанометрового металлического слоя из решения уравнения (12).

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с измерительной установкой в составе векторного анализатора цепей Agilent PNA-L N5230A 10 МГц – 40 ГГц, двух коаксиальных кабелей, двух коаксиально-волноводных переходников и измерительного волноводного тракта.
2. Подсоединить коаксиальные кабели к анализатору цепей, подсоединить коаксиально-волноводные переходники к коаксиальным кабелям. К правому коаксиально-волноводному переходнику подсоединить волноводную секцию со съемной крышкой. Левый коаксиально-волноводный переходник обозначается как **Port 1**, правый с присоединенной к нему волноводной секцией – **Port 2**.
3. Выбрать частотный диапазон на передней панели. **Start/Center-F1**– установить частоту низкочастотной границы диапазона 8.2 ГГц последовательностью **8.2-G/n-Enter**. **Start/Center-F2**– установить частоту высокочастотной границы диапазона 12.4 ГГц последовательностью **12.4-G/n-Enter**.
4. Провести калибровку измерительной установки по следующей схеме
 1. Меню **Calibration-Calibration Wizard-SmartCal-2 Port Cal**–в обоих выпадающих списках с левой стороны выбрать **X-band**

waveguide, в выпадающих списках с правой стороны будет указан номер соответствующего калибровочного набора **X11644A**

2. Подсоединить короткозамыкатель из калибровочного набора к **Port 1**—нажать кнопку **Measure—Next**
3. Подсоединить короткозамыкатель из калибровочного набора к **Port 2**— нажать кнопку **Measure—Next**
4. Подсоединить **Port 1** к **Port 2**—нажать кнопку **Measure—Next**
5. Вставить между **Port 1** и **Port 2** четвертьволновую пластину из калибровочного набора—нажать кнопку **Measure—Next**
6. Нажать кнопку **Save as User Calset**, записать название калибровочного файла, нажать кнопку **Save**.
5. Выключить СВЧ-мощность нажатием кнопки **Power—F2**. Отсоединить четвертьволновую пластину и подсоединить **Port 1** к **Port 2**.
6. Снять крышку волноводной секции и собрать внутри нее 11-слойный фотонный кристалл. Нечетные слои – из поликора (Al_2O_3) толщиной 1 мм, четные – из фторопласта толщиной 7 мм. Установить крышку волноводной секции, включить СВЧ-мощность нажатием кнопки **Power—F2**, записать спектры отражения и прохождения СВЧ-излучения через меню **File—Save As**. Тип файла—**s2p**. Пронаблюдать наличие фотонной запрещенной зоны.
7. Создать нарушение периодичности в виде изменения толщины центрального слоя до 3 мм. Измерить соответствующие спектры отражения и прохождения СВЧ-излучения. Пронаблюдать появления «окна прозрачности» в фотонной запрещенной зоне.
8. Поместить непосредственно за фотонным кристаллом, с нарушенным центральным слоем (3 мм), исследуемую структуру в виде тонкого нанометрового слоя металла (тантал) на диэлектрической подложке (поликор Al_2O_3). Измерить соответствующие спектры отражения и прохождения СВЧ-излучения. Пронаблюдать изменение частотного

положения и формы «окна прозрачности» в фотонной запрещенной зоне.

9. Создать нарушение периодичности в виде изменения толщины центрального слоя до 4 мм. Измерить соответствующие спектры отражения и прохождения СВЧ-излучения. Пронаблюдать появления «окна прозрачности» в фотонной запрещенной зоне.
10. Поместить непосредственно за фотонным кристаллом, с нарушенным центральным слоем (4 мм), исследуемую структуру в виде тонкого нанометрового слоя металла (тантал) на диэлектрической подложке (поликор Al_2O_3). Измерить соответствующие спектры отражения и прохождения СВЧ-излучения. Пронаблюдать изменение частотного положения и формы «окна прозрачности» в фотонной запрещенной зоне.
11. Получить значение электропроводности из решения однопараметровой обратной задачи, воспользовавшись алгоритмом расчета, представленной в теоретическом описании к данной лабораторной работе.
- 12.

Контрольные вопросы

Предварительное собеседование

1. СВЧ-методы измерения. Особенности, преимущества и недостатки.
2. Использование фотонных кристаллов для измерения параметров материалов
3. Теоретическое описание взаимодействия СВЧ-волны с одномерным волноводным фотонным кристаллом
4. Метод определения электропроводности металлических слоев с использованием СВЧ фотонных кристаллов
5. Особенности решения обратной задачи

Окончательное собеседование

1. Методы определения толщин металлических нанослоев
2. Методы определения электропроводности металлических нанослоев
3. Описание измерительной установки, процесса калибровки и измерений
4. Обоснование выбора геометрической конфигурации измерительной системы для определения электропроводности металлического слоя.
5. Анализ экспериментально полученных спектров отражения и прохождения СВЧ-излучения и результатов расчета электропроводности нанометровых металлических слоев.

Литература

Основная:

- 1 Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов С.А. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения// Вестник Российской Академии Наук. 2008. Т. 78, № 5. С. 438–457.
- 2 Миттра Р. Критический взгляд на метаматериалы// Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52, №9. С. 1051–1058.
- 3 Никитов С.А., Гуляев Ю.В., Д. А. 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. 35-38.
- 4 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.
- 5 Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Методика измерения электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения// Известия вузов. Электроника. 2006. №6. С. 27–35.

Дополнительная:

- 1 Yablonovitch E. Photonic band-gap structures// Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics. 1993. Vol. 10, no.2. pp. 283–295.

- 2 Архипкин, В. Г. Фотонные кристаллы и нанокomпозиты. Структурoобразование, оптические и диэлектрические свойства [Электронный ресурс] : учебное пособие /Новосибирск : Сибирское отделение РАН, 2009.-257 с. Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks.
- 3 Усанов Д.А., Никитов С.А. Скрипаль А.В., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Измерение параметров твердых и жидких диэлектриков на сверхвысоких частотах с использованием микрополосковых фотонных структур// Радиотехника и электроника. 2012, том. 57. № 2. С. 230–236.

Учебное издание

Усанов Дмитрий Александрович,
Скрипаль Александр Владимирович,
Пономарев Денис Викторович

Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов

Учебное пособие

для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий, обучающихся по магистерской программе «Электроника и наноэлектроника»
для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий

Форма издания: Электронная