

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФОТОННОГО
КРИСТАЛЛА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

студента 4 курса 4051 группы

направления 11.03.04, профиль «Электроника и наноэлектроника»

код и наименование направления

института физики

наименование факультета, института

Дударева Саввы Дмитриевича

фамилия, имя, отчество

Научные руководители

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Скрипаль А.В.

инициалы, фамилия

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Латышева Е.В.

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Скрипаль А.В.

инициалы, фамилия

Саратов 2023 г.

Введение

Фотонные кристаллы представляют собой искусственно созданные периодические гетерогенные среды и относятся к классу метаматериалов. Периодические фотонные структуры СВЧ-диапазона находят важное практическое применение в системах связи и телекоммуникации, при создании антенн, радарной техники и измерительного оборудования. При помощи электрического и магнитного поля возможно управление амплитудно-частотными характеристиками СВЧ фотонных кристаллов, такими как изменение амплитуды и частоты пика пропускания ФК, а так же ширины запрещенной зоны фотонного кристалла.

При использовании полупроводниковых структур, представляющих собой n^+ - n -структуры, возникает необходимость измерения параметров как n^+ -слоя, так и n -слоя.

Для измерения с высокой степенью точности параметров сильнолегированного слоя, выполняющего, достаточно часто, роль основного функционального элемента таких структур, необходимо проведение предварительных измерений характеристик слаболегированного n -слоя, играющего роль подложки.

Целью настоящей работы является обоснование способа измерения параметров слаболегированной подложки: удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости с использованием одномерного СВЧ фотонного кристалла.

1 Результаты экспериментального определения параметров полупроводниковых структур с использованием спектров отражения и прохождения одномерных волноводных фотонных кристаллов

Для одновременного нахождения электропроводности σ и диэлектрической проницаемости ε_n полупроводникового образца по частотным зависимостям $D(\omega)$ и $R(\omega)$ был использован метод наименьших квадратов, при реализации которого находится такое значение параметров σ и ε_n , при котором сумма $S(\sigma_n, \varepsilon)$ квадратов разностей расчетных, $|D(\omega, \sigma_n, \varepsilon_n)|^2$ и $|R(\omega, \sigma_n, \varepsilon_n)|^2$ и экспериментальных, $|D_{\text{эксп}}|^2$ и $|R_{\text{эксп}}|^2$, значений квадратов модулей коэффициентов прохождения и отражения

$$S(\sigma_n, \varepsilon) = \sum_{i=1}^K \left(\left(|D(\omega_i, \sigma_n, \varepsilon)|^2 - |D_{i \text{ эксп}}|^2 \right)^2 + \left(|R(\omega_i, \sigma_n, \varepsilon)|^2 - |R_{i \text{ эксп}}|^2 \right)^2 \right), \#(1)$$

становится минимальной. Здесь K – число измеренных значений коэффициентов прохождения и отражения.

Искомые значения параметров исследуемого образца определяются численным методом в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial S(\sigma_n, \varepsilon)}{\partial \sigma_n} = 0, \\ \frac{\partial S(\sigma_n, \varepsilon)}{\partial \varepsilon} = 0. \end{cases}, \#(2)$$

Функция невязок $S(\sigma_n, \varepsilon_n)$, определяемая выражением (1), для случая, когда толщина t_n полупроводникового слоя Si составляла 348 мкм, его электропроводность $\sigma_n = 0.021 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, обладает глобальным минимумом в пространстве координат $(\sigma_n, \varepsilon_n, S(\sigma_n, \varepsilon_n))$, а контурные карты (рисунок 1) характеризуются наличием замкнутых траекторий вблизи минимума, что

подтверждает возможность однозначно определять толщину и электропроводность полупроводникового слоя.

На рисунке 2 представлены экспериментальные и расчетные частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения и прохождения для фотонной структуры при значениях электропроводности полупроводникового слоя $\sigma_n = 0.021 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ и его диэлектрической проницаемости $\epsilon_n = 11.71$, определённых из решения обратной задачи.

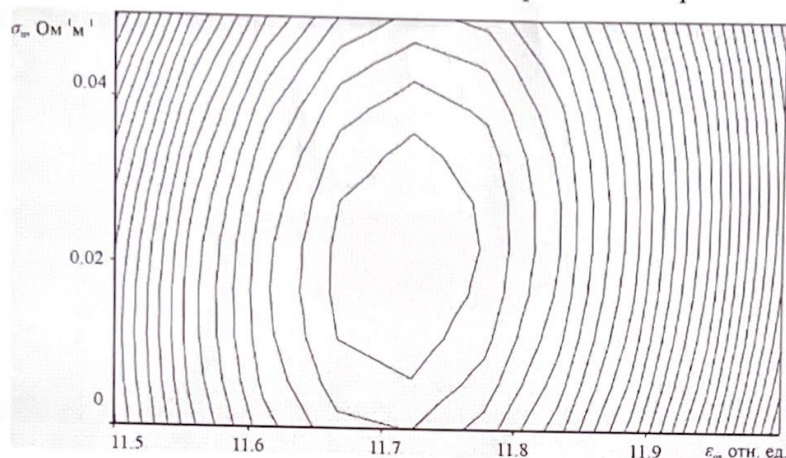


Рисунок 1 Вид контурных карт в плоскости искомых параметров σ_n, ϵ_n для образца толщиной $t_n = 348 \text{ мкм}$, электропроводностью $\sigma_n = 0.021 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_n = 11.71$

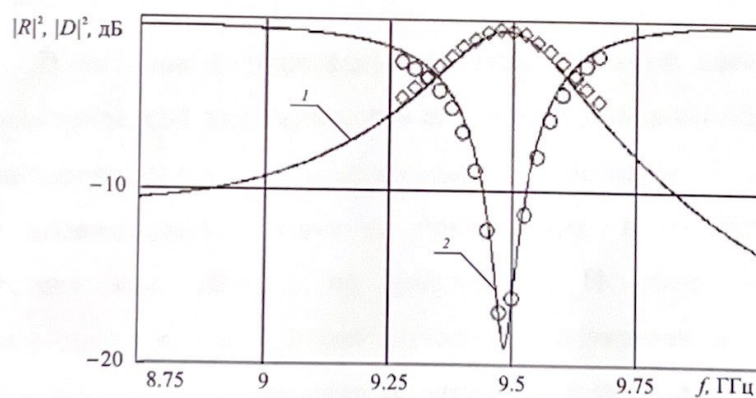


Рисунок 2 Экспериментальные ($\diamond\diamond\diamond$, $\circ\circ\circ$) и расчетные (линии) частотные зависимости $|D|^2$ (кривая 1) и $|R|^2$ (кривая 2) для фотонной структуры, содержащей полупроводниковый образец толщиной $t_n = 348 \text{ мкм}$, электропроводностью $\sigma_n = 0.021 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_n = 11.71$

Для исследования возможности проведения неразрушающего контроля параметров полупроводниковых пластин, выпускаемых промышленностью пластин, образцы располагались, как показано на рисунке 3. Полупроводниковый образец круглой формы помещался вплотную между двумя зафиксированными по горизонтали и вертикали волноводами, в одном из которых располагались первые шесть слоев фотонного кристалла, включая нарушение периодичности, остальные слои фотонного кристалла располагались во втором волноводе.

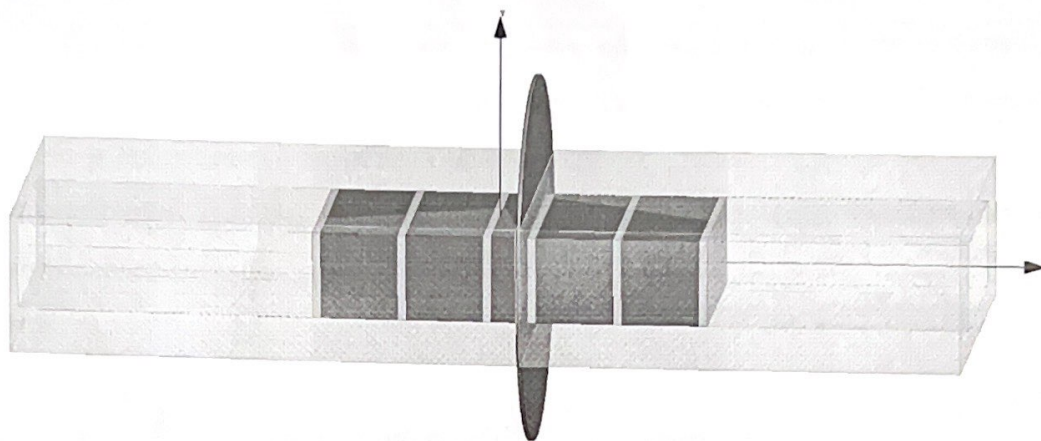


Рисунок 3 Расположение выпускаемых промышленностью пластин в измерительной секции

В таблице 1 приведены значения удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости полупроводникового образца, полученные экспериментально предложенным методом для различных полупроводниковых пластин, помещенных в исследуемый фотонный кристалл как указано на рисунке 3. Искомые значения удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости полупроводниковых слоев определялись численным методом в результате решения обратной задачи с использованием функции невязки (1) в программе MathCad.

Таблица 1

Материал	t_n , мкм	ϵ , отн. ед.	σ_n , Ом ⁻¹ м ⁻¹
GaAS	350	12.2	0.15
Si	350	11.6	7.66
Si	348	11.6	0.69
Si	478	11.6	0.69
Si	359	11.7	0.72

Таким образом, проведенное решение обратной задачи демонстрирует возможность неразрушающего контроля измерения параметров тонких полупроводниковых пластин, выпускаемых промышленностью, при расположении образца между двумя волноводами, содержащими слои фотонного кристалла.

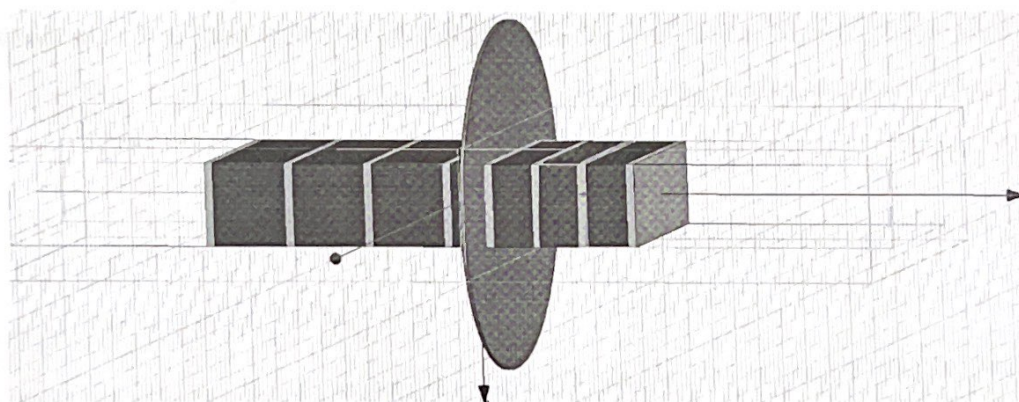


Рисунок 4 Модель с двумя одномерными фотонными кристаллами

Для исследования возможности проведения неразрушающего контроля параметров полупроводниковых пластин, выпускаемых промышленностью, полупроводниковый образец круглой формы помещался вплотную между двумя волноводами, в одном из которых располагался первый фотонный кристалл, включая нарушение периодичности, а во втором другой фотонный кристалл.

Первый одномерный волноводный фотонный кристалл, составленный из одиннадцати слоев, которые образуют структуру из периодически повторяющихся элементов. Каждый элемент включает в себя два слоя. Нечетные слои выполнены из поликора (Al_2O_3 , $\epsilon = 9,6$), четные – из тефлона ($\epsilon = 2,0$). Длина нечетных отрезков 0,5 мм, четных – 9,0 мм. Каждый элемент фотонного кристалла полностью заполнял поперечное сечение волновода размером 23x10 мм. Геометрические размеры и электрофизические параметры элементов подбирались таким образом, чтобы запрещенная зона фотонного кристалла располагалась в трехсантиметровом диапазоне длин волн.

Нарушение создавалось посредством изменения толщины двенадцатого слоя, и введением слоя полупроводникового материала толщиной t_n между первым и вторым фотонными кристаллами. Толщина нарушенного двенадцатого (фторопласт) слоя выбиралась равной 4 мм, в результате чего примесная мода располагалась вблизи середины запрещенной зоны. Расположение образца продемонстрировано на рисунке 5.

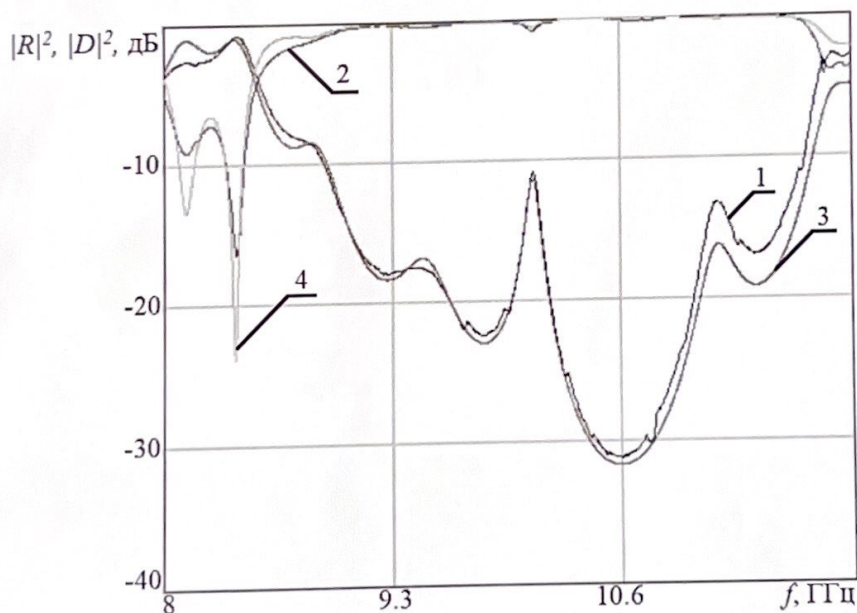


Рисунок 5 Экспериментальные (1,2) и расчетные (3,4) частотные зависимости $|D|^2$ (кривые 2,4) и $|R|^2$ (кривые 1,3) для описанной фотонной структуры

Ввиду хорошего количественного совпадения эксперимента и результатов расчетов квадратов модулей коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения с описанной структурой представляется возможным проведение неразрушающего контроля параметров полупроводниковых образцов при их расположении двумя фотонными кристаллами, середина запрещенной зоны которых находится на одной частоте.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие результаты:

Построена математическая модель и проведено компьютерное моделирование частотных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности, содержащим полупроводниковый слой.

Проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик коэффициентов пропускания и отражения СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности, содержащим полупроводниковый слой.

Теоретически обоснован и экспериментально реализован способ измерения параметров слаболегированной подложки: удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости с использованием одномерного СВЧ фотонного кристалла. В основу метода измерения положено решение обратной задачи, основанное на минимизации разности экспериментальных и расчетных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне фотонного СВЧ-кристалла, содержащего исследуемый полупроводниковый материал.

Кроме того, предложен способ проведения неразрушающего контроля параметров полупроводниковых пластин, выпускаемых промышленностью, при расположении образца между двумя волноводами, содержащими слои фотонного кристалла.

Также предложен способ проведения неразрушающего контроля параметров полупроводниковых образцов при их расположении между двумя фотонными кристаллами, середина запрещенной зоны которых находится на одной частоте.

Список использованных источников

1. Гершензон Е. М., Литвак – Горская Л. Б., Плохова Л. А., Зарубина Т. С. Методы определения параметров полупроводников и полупроводниковых пленок на СВЧ. — В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Е. А. Федотова, М., 1970, вып. 23. С. 3 – 48.
2. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Детектирование МЭП-диодами, работающими в активном режиме // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1980. № 10. С. 62 - 63.
3. Усанов Д. А. Физика работы полупроводниковых приборов в схемах СВЧ / Д.А.Усанов, А.В. Скрипаль. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1999. 376 с.
4. Викторов В. А. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В.А Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков. М.: Энергоатомиздат, 1989. 208 с.
5. Усанов Д.А. СВЧ-методы измерения параметров полупроводников. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1985. 55 с.
6. Арапов Ю.Г., Давыдов А.Б. Волноводные методы измерения электрофизических параметров полупроводников на СВЧ // Дефектоскопия. 1978. № 11. С. 63–87.
7. Касимов Э.Р., Садыхов М.А., Касимов Р.М., Каджар Ч.О. Метод измерения диэлектрических свойств сильнопоглощающих веществ в диапазоне СВЧ // Радиотехнические измерения. 2002. Вып. 3. С. 45–47.
8. Cheikh R.H., Gunn M.W. Wave propagation in a rectangular waveguide inhomogeneously filled with semiconductors // IEEE Trans. 1968. Vol. MTT-16, № 2. P. 117–121.
9. Коломейцев В. А., Лойко В. А., Дрогайцева О. В., Хамидуллин А. Ф. Исследование процесса нагрева диэлектрических материалов в СВЧ установках на основе нерегулярных ВСС // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26: сб. тр. XXVI междунар. науч. конф., г. Н. Новгород, 27-30 мая 2013 г.: в 10 т.. 2013. Т. 10. С. 27-30.
10. Коломейцев В. А., Семенов А. Э., Дрогайцева Н. В., Шмаров Д. А. Метод решения нелинейной ВКЗЭиТ для волноводных и резонаторных структур с частичным заполнением // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-26 : сб. тр. XXVI междунар. науч. конф., г. Н. Новгород, 27-30 мая 2013 г.: в 10 т.. 2013. Т. 10. С. 31-34.

