

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

Резонансные характеристики брэгговских структур в СВЧ-диапазоне

наименование темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

**АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
БАКАЛАВРА**

студента 4 курса 4051 группы

Направления (специальности) 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

код и наименование направления (специальности)

Институт физики

наименование факультета, института, колледжа

Чипига Роман Владимирович

фамилия, имя, отчество

Научные руководители

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

17.06.24
подпись, дата

Скрипаль А.В.

инициалы, фамилия

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

17.06.24
подпись, дата

Пономарев Д.В.

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

17.06.24
подпись, дата

Скрипаль А.В.

инициалы, фамилия

Саратов 2024

Введение

Прогресс науки и техники всегда связан с инновациями в области материаловедения, электроники и физики твёрдого тела. Одним из наиболее интересных и перспективных направлений в электронике, материаловедении и фотонике является изучение фотонных кристаллов.

В теоретической части представлены базовые понятия и определения в области фотонных кристаллов, а также классификация этих уникальных структур на одномерные, двумерные и трехмерные. Отмечены особенности их построения, принципы их работы, и перспективы их работы.

Практическая часть работы включает подробное изучение дефектных мод фотонного кристалла. Изучались коэффициенты отражения и пропускания на частотах дефектных мод, которые позволят в дальнейшем применять полученные знания для проектирования и создания новых материалов и устройств с требуемыми свойствами.

Целью работы является исследование резонансных характеристик брэгговских структур в СВЧ-диапазоне.

Для достижения поставленной цели необходимо было найти решение следующих задач:

- Анализ основных свойств фотонных кристаллов
- Составление теоретических моделей СВЧ-фотонного кристалла с различными нарушениями периодичности слоёв в структуре кристалла.

- Описание зависимостей резонансной частоты и амплитуды от толщины нарушения и их влияние на дефектные моды фотонного кристалла
- Проведение численного анализа полученной модели, с исследованием различных параметров нарушения на дефектные моды фотонного кристалла.
- Получение экспериментальных зависимостей параметров от толщины нарушения на составленных фотонных кристаллах и сравнение результатов с результатами численного анализа.
- Оформление полученных результатов исследования и формулирование выводов.

В практической части рассматривается моделирование и экспериментальное исследование характеристик брэгговских структур СВЧ-диапазона со сложным нарушением.

Идея моделирования и последующего эксперимента заключается в изменении характеристик отражения и пропускания при изменении крайнего правого слоя в нарушениях с разными фиксированными толщинами других слоёв и в анализе результатов измерений этих характеристик.

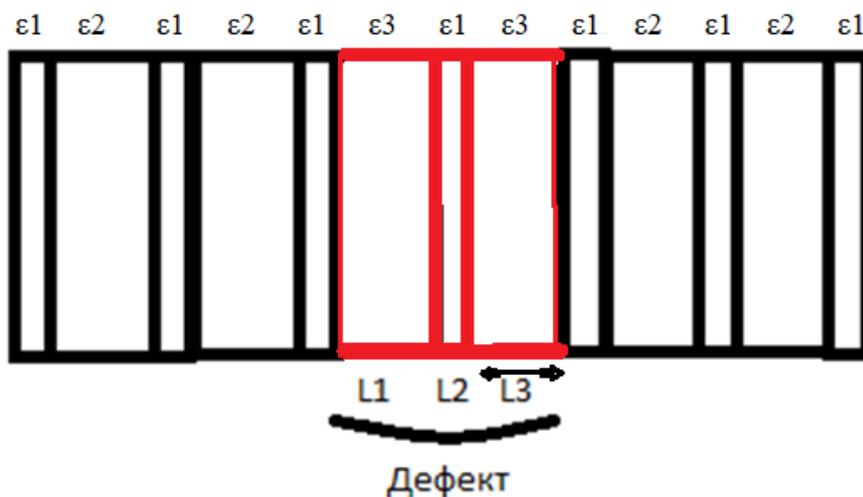


Рис. 1 Структура одномерного фотонного кристалла

Для моделирования и эксперимента был применён одномерный волноводный фотонный кристалл, состоящий из одиннадцати слоёв с периодически повторяющейся структурой. Слои различаются по материалу: нечётные слои изготовлены из поликора (Al_2O_3 , $\varepsilon = 9,6$), чётные — из тефлона ($\varepsilon = 2,0$). Длина нечётных участков составляет 1 мм, а чётных — 9 мм. Нарушение создавалось посредством изменения структуры и длины центрального слоя. Были смоделированы 3 структуры с разными нарушениями. Два нарушения являются сложными, состоящими из трёх слоёв: воздух - поликоровая пластина - воздух 9 1 N, 11 0.5 N. Третье нарушение состоит только из воздуха.

Данная структура была размещена на границе между нарушенным центральным слоем тефлона и следующим слоем поликора. Затем она была ориентирована двумя способами относительно направления распространения электромагнитных волн. Расположение образца внутри нарушенного слоя и его ориентация относительно нарушенного слоя (конфигурация 1 и 2) в фотонном кристалле представлены на рис. 1.

Исследуемые образцы представляются в виде структур с общей толщиной $t_s = t_n + t_{\text{под}}$, которые состоят из сильнолегированного полупроводникового эпитаксиального n^+ -слоя с толщиной t_n и электропроводностью σ_n , а также полупроводниковой подложки с толщиной $t_{\text{под}}$ и электропроводностью $\sigma_{\text{под}}$.

Для расчета частотной зависимости коэффициентов отражения $R(\omega)$ и пропускания $D(\omega)$ электромагнитной волны при условии её нормального падения на многослойную структуру, которая полностью заполняет волновод по поперечному сечению и имеет плоскости слоев, перпендикулярные направлению распространения излучения, использовались выражения.

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

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

в которых элементы $\mathbf{T}_N[1,1]$, $\mathbf{T}_N[1,2]$, $\mathbf{T}_N[2,1]$ и $\mathbf{T}_N[2,2]$ матрицы передачи \mathbf{T}_N структуры, состоящей из N слоев, определяются из соотношения

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

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

Постоянные распространения электромагнитной волны в полупроводниковых слоях рассчитывались с использованием выражения

$$\gamma_{\text{п.под}} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_{\text{п.под}}^* \varepsilon_0 \mu_0},$$

где $\varepsilon_{\text{п.под}}^* = \varepsilon'_{\text{п.под}} - j\varepsilon''_{\text{п.под}}$ – комплексные диэлектрические проницаемости сильнолегированного полупроводникового n^+ -слоя и полупроводниковой подложки;

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

комплексной диэлектрической проницаемости сильнолегированного полупроводникового n^+ -слоя и полупроводниковой подложки;

$\varepsilon_{\text{п.под}}$, $\sigma_{\text{п.под}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость решетки и электропроводность сильнолегированного n^+ -слоя полупроводника и полупроводниковой подложки соответственно;

$m_{\text{п.под}}^*$, $n_{\text{п.под}}$ – эффективная масса и концентрация электронов в сильнолегированном полупроводниковом n^+ -слое и полупроводниковой подложке;

a – размер широкой стенки волновода;

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота электромагнитной волны; ε_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума.

Чтобы достичь единовременное нахождение электропроводности $\sigma_{\text{под}}$ полупроводниковой подложки, электропроводности $\sigma_{\text{п}}$ и толщины $t_{\text{п}}$ сильнолегированного полупроводникового n^+ -слоя по зависимостям $D(\omega)$ и $R(\omega)$ от частоты использовался метод наименьших квадратов. При реализации данного метода найдётся такое сочетание значений параметров $\sigma_{\text{под}}$, $t_{\text{п}}$ и $\sigma_{\text{п}}$, при котором сумма $S(\sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})$ квадратов разностей расчетных значений квадратов модулей коэффициентов прохождения и отражения $|D(\omega, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2$ и $|R(\omega, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2$ и экспериментальных (исходных) $|D_{\text{экс}}|^2$ и $|R_{\text{экс}}|^2$, измеренных при двух различных конфигурациях нарушенного фотонного кристалла, станет наименьшей:

$$S(\sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}}) = \sum_{i=1}^K \left(\begin{aligned} & \left(|D_1(\omega_i, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2 - |D_{i1\text{экс}}|^2 \right)^2 + \\ & + \left(|R_1(\omega_i, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2 - |R_{i1\text{экс}}|^2 \right)^2 + \\ & + \left(|D_2(\omega_i, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2 - |D_{i2\text{экс}}|^2 \right)^2 + \\ & + \left(|R_2(\omega_i, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2 - |R_{i2\text{экс}}|^2 \right)^2 \end{aligned} \right). \quad (3)$$

Здесь K – число измеренных значений коэффициентов прохождения и отражения.

Были смоделированы 3 структуры с разными нарушениями. Два нарушения являются сложными, состоящими из трёх слоёв: левый слой воздуха (толщина L1)–поликоровая пластина (толщина L2)–правый слой воздуха (толщина L3). Третье нарушение выполнено только из воздушного слоя (толщина L).

При этом первые два нарушения отличались друг от друга толщиной поликоровой пластины L2.

В процессе моделирования были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики коэффициентов пропускания фотонных кристаллов с каждым типом нарушения периодичности.

Моделирование АЧХ проводилось в диапазоне частот от 7 ГГц до 14 ГГц. Величины коэффициента пропускания представлены в единицах дБ.

С использованием полученных амплитудно-частотных характеристик были определены зависимости частоты и амплитуды дефектной моды от размера нарушения для структур типа 1, 2 и 3.

В результате сравнения полученных зависимостей были отмечены следующие тенденции.

Изменение толщины элемента сложного нарушения приводит к монотонному уменьшению частоты дефектной моды СВЧ фотонного кристалла. При этом изменение частоты дефектной моды зависит от наличия в структуре нарушения поликоровой пластины. В зависимости от толщины поликоровой пластины наблюдается различная величина уменьшения частоты дефектной моды с увеличением толщины элемента сложного нарушения.

Зависимости амплитуды $T_{рез}$ дефектной моды фотонного кристалла от размера нарушения для структур типа 1 и 2 носят немонотонный характер. При определённом значении нарушения амплитуда дефектной моды достигает максимального значения, близкого к 0.0 дБ.

В экспериментальной части исследовался одномерный фотонный кристалл, созданный в соответствии с описанной выше моделью, в диапазоне частот 7–13 ГГц.

Экспериментальный макет ФК изготовлен из набора чередующихся плоскопараллельных пластин, которые были размещены в отрезке волновода сечением 23x10 мм². Диэлектрическая проницаемость ϵ пластин,

образующих нечётные и чётные слои фотонного кристалла толщиной 1.0 мкм и 9.0 мкм в количестве одиннадцати, составляла $\varepsilon = 9.6$ (Al_2O_3) и $\varepsilon = 2.0$ (тефлон), соответственно. В фотонном кристалле создавалось нарушение периодичности в виде замены центрального слоя из тефлона на воздушный отрезок определённой длины.

В процессе эксперимента были изучены амплитудно-частотные характеристики коэффициентов пропускания фотонных кристаллов с каждым типом нарушения периодичности.

Аналогично процессу моделирования, с использованием полученных амплитудно-частотных характеристик были определены экспериментальные зависимости частоты и амплитуды дефектной моды от размера нарушения для структур типа 1, 2 и 3.

Из результатов эксперимента следует, что изменение толщины элемента сложного нарушения приводит к монотонному уменьшению частоты дефектной моды СВЧ фотонного кристалла. Этот результат соответствует результатам проведённого выше компьютерного моделирования. При этом величина изменения частоты дефектной моды при наличии в структуре нарушения поликоровой пластины существенно больше, чем в случае её отсутствия.

Экспериментальные зависимости амплитуды $T_{\text{рез}}$ дефектной моды фотонного кристалла от размера нарушения для исследуемых структур носят немонотонный характер. При определённом значении нарушения амплитуда дефектной моды достигает максимального значения.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были исследованы резонансные характеристики брэгговских структур со сложным нарушением в СВЧ-диапазоне.

Были рассмотрены дефектные моды в фотонных кристаллах с нарушением в виде сложной структуры, состоящей из трёх слоёв.

Выполнен расчёт АЧХ коэффициентов пропускания фотонных кристаллов с нарушением периодичности в виде трёхслойной структуры первого типа с фиксированным значением толщин двух слоёв и переменным значением толщины третьего слоя.

В результате расчётов установлен характер изменения частоты и амплитуды дефектной моды коэффициента пропускания от размера нарушения в зависимости от наличия в структуре нарушения диэлектрического образца.

Собран макет волноводного фотонного кристалла со сложной структурой нарушения.

Получены экспериментальные АЧХ коэффициентов пропускания фотонных кристаллов с нарушением периодичности в виде трёхслойной структуры.

Установлено, что результаты эксперимента качественно соответствуют результатам компьютерного моделирования.

Результаты, полученные в ходе выполнения выпускной квалификационной работы, могут быть использованы при проектировании перестраиваемых фильтров пропускания СВЧ-диапазона.

Список использованных источников

1. Усанов Д.А., С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, Латышева Е.В. Измерения электрофизических характеристик полупроводниковых структур с использованием СВЧ фотонных кристаллов// Известия вузов. Электроника. 2016. Т. 21. №2. С. 187-194.
2. E. Yablonovitch. Photonic crystals// Journal of modern optics, 1994, vol. 41, no. 2, p. 173-194
3. Д. А. Усанов, С. А. Никитов, А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев. СВЧ фотонные кристаллы—новая разновидность периодических структур в радиоэлектронике // Издательство Саратовского университета 2016
4. Yablonovitch E., Gmitter T.J., and Leung K.M. // The American Physical Society. 1991. Vol. 67. № 17. P. 2295–2298
5. 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, 2013, том 448, No 1, с. 35–37