

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

Кафедра физики твёрдого тела

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СВЧ ФОТОННЫЕ
КРИСТАЛЛЫ

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 4051 группы
направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
института физики
Апокиной Антонины Владимировны

Научные руководители:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

15.06.2022

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

Д.В. Пономарев

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой,

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

15.06.2022

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2022

Введение

В настоящий период одной с наиболее усиленных развивающихся сфер науки является направление по созданию и исследованию свойств метаматериалов, представляющих собой искусственно созданные гетерогенные среды. По аналогии с реальными кристаллами, в фотонных кристаллах существуют разрешенные и запрещенные для распространения электромагнитного излучения частотные области.

Уникальные качества фотонных кристаллов, предопределенные резонансным взаимодействием электромагнитной волны вместе с периодической структурой, дают возможность создавать на их базе новейшие виды структур, а также устройств вместе с управляемыми параметрами, а кроме того, реализовать новые высокочувствительные методы измерения параметров использованных материалов.

В СВЧ спектре более успешными аналогами одномерных полупроводниковых ФК, представляющих собой чередующиеся слои с разнообразным показателем преломления, являются микрополосковые структуры, численный вычисление которых в квазистатическом приближении хорошо согласуется вместе с экспериментом. Стоит отметить, что микрополосковые модели отличаются простотой и технологичностью в изготовлении и являются одним из самых наиболее распространённых элементов СВЧ техники.

Микрополосковые линии в настоящее время является основным видом линий передач микросборок СВЧ и ДЦМ диапазонов.

Микрополосковые линии крайне распространены, имеют важное практическое значение, поэтому особый интерес представляет сочетание свойств ФК и микрополосковых линий передач. В силу того, что свойства диэлектрической подложки достаточно сложно поменять, перспективным представляет использование полупроводниковых подложек так как свойства полупроводников можно изменить при помощи внешних воздействий.

Целью данной работы является выявление особенностей АЧХ микрополосковых линий одномерного фотонного кристалла в СВЧ диапазоне, представляющего собой микрополосковую линию передачи с полупроводниковой подложкой.

Задачи работы:

- 1) провести анализ состояния исследований в данной области;
- 2) создание математической модели микрополоскового фотонного кристалла на полупроводниковой подложке;
- 3) провести компьютерное моделирование спектров отражения и прохождения СВЧ излучения, взаимодействующего с полупроводниковыми подложками.

Дипломная работа занимает 41 страниц, имеет 25 рисунков.

Во введении рассматривается актуальность работы, устанавливается цель и выдвигаются задачи для достижения поставленной цели. В первом разделе «Микрополосковые фотонные кристаллы» изучены основные теоретические аспекты фотонного кристалла в СВЧ диапазоне и его параметры. Во втором разделе работы «Математическая модель микрополосковых фотонных кристаллов» проведен расчет коэффициентов прохождения и отражения электромагнитной волны. В третьем разделе работы «Компьютерное моделирование амплитудно-частотной характеристики для различных ширин и длин элементов фотонного кристалла» было проведено моделирование. В заключении подведены основные результаты работы.

Основное содержание работы

Понятие фотонного кристалла

Фотонные кристаллы представляют собой структуры, характеризующиеся периодическим изменением диэлектрической проницаемости в пространстве. Оптические характеристики ФК очень

отличаются от оптических параметров сплошных сред. Распространение излучения внутри фотонного кристалла вследствие периодичности среды становится схожим на движение электрона внутри обыкновенного кристалла под действием периодического потенциала.

Уникальные качества фотонных кристаллов, предопределенные резонансным взаимодействием электромагнитной волны вместе с периодической структурой, дают возможность создавать на их базе новейшие виды структур, а также устройств вместе с управляемыми параметрами, а кроме того, реализовать новые высокочувствительные методы измерения параметров использованных материалов. Одномерные микрополосковые фотонные кристаллы (МФК) являются наиболее удачными аналогами диэлектрических ОФК. В совокупном случае МФК предполагают собой последовательно объединенные чередующиеся отрезки линий вместе с «большой» шириной полоскового проводника, имитирующие слои вместе с большими показателями преломления, а также вместе с «малой» шириной проводника, имитирующие слои вместе с низкими показателями преломления.

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.

Микрополосковые линии передачи

Полосковая линия — линия передачи, представляет собой волновод с целью передачи электромагнитных волн в воздушной либо другой диэлектрической среде вдоль двух либо многих проводников, обладающих форму тонких полосок, а также пластинок.

Простым типом линии передач является симметричная полосковая линия. Такого типа линии могут распространяться поперечные Т-волны, таким образом, отсутствует дисперсия. Помимо этого, электромагнитное поле сосредоточено в зоне диэлектрика, то что наряду с характеристикой пространственной симметрии значительно упрощает исследование.

Особенностями ПЛ являются:

- малые габаритные размеры и масса, поскольку используемый в них диэлектрик представляет собой тонкие пластины, а металлические плоскости – тонкие пленки;
- большая широкополосность – критическая частота $f_{кр}$ основной волны ПЛ равна нулю (по ПЛ может протекать постоянный ток);
- удобное сопряжение с активными полупроводниковыми приборами;
- невысокая стоимость, поскольку сами ПЛ и СВЧ узлы на их основе даже весьма сложной структуры могут быть выполнены по единой технологии одновременно, а плоская форма их конструкций облегчает автоматизацию производства с хорошей воспроизводимостью параметров и характеристик.

Микрополосковая линия является неоднородной линией передачи, так как не все силовые линии поля между полосковым проводником и заземленной пластиной проходят через подложку. Поэтому волна, распространяющаяся вдоль микрополоскового проводника, является не чистой Т-волной (является «квази – Т-волной»). Эффективная

диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\text{эф}}$ меньше диэлектрической проницаемости подложки, так как она учитывает поле вне подложки.

Математическая модель микрополосковых фотонных кристаллов

В данной работе рассматривался микрополосковый фотонный кристалл, созданный в виде последовательно соединенных отрезков микрополосковой линии передачи. Микрополосковый фотонный кристалл, представлять собой четырехполюсником сложной структуры, способен быть показан каскадным объединением элементарных четырехполюсников вместе с известными матрицами передачи, любой из которых показывает отдельный отрезок микрополосковой линии передачи, а также прямое объединение каждой из пар отрезков вместе с разной шириной верхнего полоска.

В целях расчета коэффициентов прохождения и отражения электромагнитной волны использовалась матрица передачи $\mathbf{T}$ четырехполюсника сложной структуры в квазистатическом приближении, выступающего собой каскадное соединение простых четырехполюсников вместе с известными матрицами передачи, которые имеют вид:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} \\ T_{2,1} & T_{2,2} \end{pmatrix} = \mathbf{T}'_N \cdot \prod_{i=1}^{N-1} (\mathbf{T}''_{i,i+1} \cdot \mathbf{T}'_i), \quad (1)$$

где $\mathbf{T}'_i$ и $\mathbf{T}''_{i,j}$ - матрица передачи четырехполюсника, описывающего соответственно i -ый отрезок и прямое соединение i -го и $(i + 1)$ -го отрезков микрополосковой линии передачи.

Выражения для матриц передачи $\mathbf{T}'_i$ и $\mathbf{T}''_{i,j}$ соответствующих элементарных четырехполюсников имеют вид:

Матрица передачи однородного отрезка линии передачи:

$$\mathbf{T}'_i = \begin{pmatrix} e^{\gamma_i L_i} & 0 \\ 0 & e^{-\gamma_i L_i} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Матрица передачи для границы между двумя отрезками линии передачи:

$$\mathbf{T}''_{i,i+1} = \begin{pmatrix} \frac{\rho_{n+1}}{\rho_m} & \frac{\rho_{n-1}}{\rho_m} \\ 2\sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_m}} & 2\sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_m}} \\ \frac{\rho_{n-1}}{\rho_m} & \frac{\rho_{n+1}}{\rho_m} \\ 2\sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_m}} & 2\sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_m}} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Здесь L_i – длина i -го отрезка, γ_i – постоянная распространения электромагнитной волны в i -м отрезке, где $\rho_i = \frac{377 \cdot h_i}{\sqrt{\varepsilon_i} \cdot W_i \left[1 + 1,735 \varepsilon^{-0,0724} \cdot \left(\frac{W_i}{h_i} \right)^{-0,836} \right]}$ – волновое сопротивление i -го отрезка структуры, ε_i , h_i – диэлектрическая проницаемость и толщина подложки i -го отрезка, W_i – ширина полоскового проводника i -го отрезка.

Компьютерное моделирование амплитудно-частотной характеристики для различных ширин и длин элементов фотонного кристалла

В ходе компьютерного моделирования рассматривалась микрополосковая фотонная структура, состоящая из одиннадцати последовательно соединенных чередующихся отрезков микрополосковой линии передачи с большой и малой шириной верхнего полоска, включенная в 50-омную линию передачи. Ширина нечетных полосков микрополосковой фотонной структуры составляла 3 мм, ширина четных – 1 мм. Длина каждого полоска составляла 5 мм. Диэлектрическая проницаемость подложки $\varepsilon = 11,8$ (Si– кремний).

Частотная зависимость коэффициента пропускания моделируемой микрополосковой фотонной структуры в диапазоне частот от 0 до 20 ГГц, рассчитанная с использованием описанной выше модели и методики расчета

в квазистатическом приближении, характеризуется наличием частотных областей, запрещенных для распространения электромагнитной волны – аналог запрещенной зоны в кристаллах. Нарушение периодичности фотонного кристалла может быть создано как изменением ширины микрополоска, так и изменением диэлектрической проницаемости подложки одного из чередующихся отрезков микрополосковой линии, приводящим к изменению постоянной распространения волны.

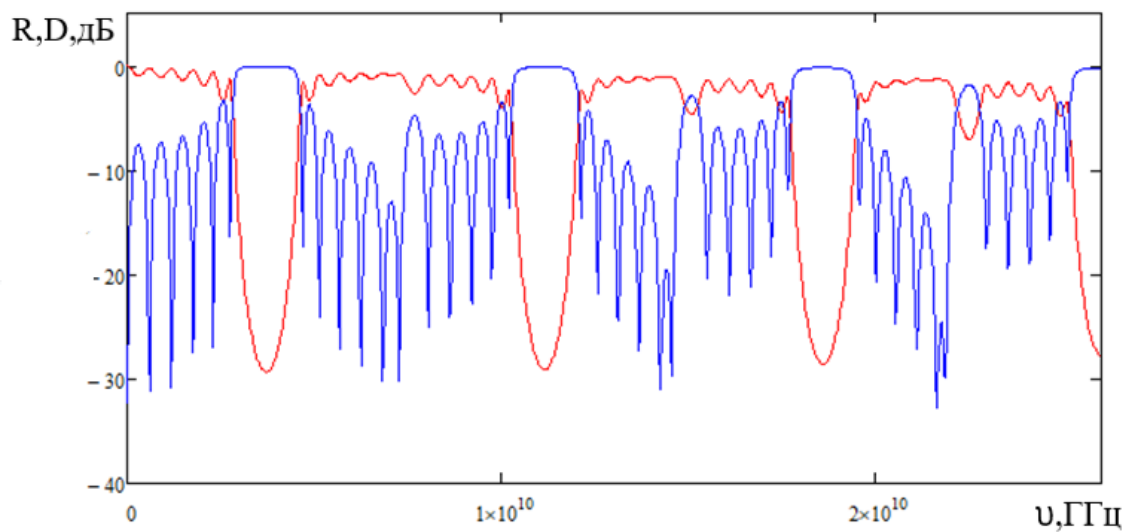


Рисунок – 1 АЧХ микрополоскового фотонного кристалла без нарушения периодичности с длиной отрезков $L_1 = 7$ мм $L_2 = 7$ мм и шириной отрезков $W_1 = 3$ мм и $W_2 = 1$ мм.

На рис. 1 представлена АЧХ микрополоскового фотонного кристалла без нарушения периодичности с увеличенной длиной отрезков микрополосковой линии $L_1 = 7$ мм $L_2 = 7$ мм и шириной отрезков $W_1 = 3$ мм и $W_2 = 1$ мм.

Это приводит к уменьшению расстояния между запрещенными зонами ФК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения бакалаврской работы были получены следующие результаты:

- 1) Рассмотрены типы полосковых линий передачи, применяемых в технике СВЧ.
- 2) Описано формирование фотонного кристалла на основе микрополосковой линии передачи с изменяющейся шириной верхнего полоска.
- 3) Представлены топологии МП ФК без нарушения периодичности и с нарушением периодичности в виде измененной длины или ширины центрального отрезка микрополосковой линии.
- 4) Рассчитаны АЧХ МП ФК без нарушения периодичности и с нарушением периодичности в виде измененной длины или ширины центрального отрезка микрополосковой линии.
- 5) Установлено появление дефектных мод на АЧХ микрополоскового фотонного кристалла с нарушением периодичности в виде измененной длины или ширины центрального отрезка микрополосковой линии фотонного кристалла.
- 6) Описано формирование фотонного кристалла на основе отрезков микрополосковой линии передачи с постоянной шириной верхнего полоска и с изменяющейся диэлектрической проницаемостью подложки.
- 7) Рассчитаны АЧХ МП ФК на основе отрезков микрополосковой линии передачи с постоянной шириной верхнего полоска и с изменяющейся диэлектрической проницаемостью подложки. Показано возникновение разрешенных и запрещенных зон на АЧХ микрополоскового фотонного кристалла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. М: «Сов. радио», 1974. - 150 с
2. Д. А. Усанов, С. А. Никитов, А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев СВЧ Фотонные кристаллы – новая разновидность периодических структур (учебное пособие). Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2016. 84 с.
3. Микроэлектроника: Учеб. пособие для втузов. В 9кн. /Под ред. Л.А. Коледова. Кн 7.
4. И.Н. Филатов, О.А. Бакрунов, П.В. Панасенко Микроэлектронные СВЧ-устройства. –М: Высшая школа, 1987. – 94с.
5. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т.1. Техника сверхвысоких частот. /Под ред. Н.Д. Девяткова. Учебник для студентов вузов по специальности “Электронные приборы”. – М: Высшая школа, 1970. – 440с.
6. Сазонов Д.Н., Гриндин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. – М: Высшая школа, 1981. – 285с.
7. Спецпрактикум по сверхвысоким частотам: Учеб. пособие /Под ред. В.С. Михалевского. – Ростов-на-Дону: Изд. Ростовского университета, 1969. – 96с.
8. Гуляев Ю.В., Никитов С.А. Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации // Радиотехника. 2003. №8. С. 26–30.
9. Волошин, А.С. Исследование микрополосковых моделей фильтров на свёрхрешётках с плавным изменением диэлектрических свойств / А.С. Волошин, Б.А. Беляев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. всероссийской научно-техн. конференции, 5-7.05.2004, г. Красноярск. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2004. – С. 313 – 317.

AB