

СВЧ фотонные кристаллы с электрически управляемыми характеристиками

Д.А. Усанов¹, С.А. Никитов², А.В. Скрипаль¹,
М.К. Мерданов³, С.Г. Евтеев¹, А.П. Фролов¹

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
410012, Российская Федерация, г. Саратов
ул. Астраханская, 83

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
125009, Российская Федерация, г. Москва
ул. Моховая, 11, корп. 7

³ АО «НПО «Электронное приборостроение»
107014, Российская Федерация, г. Москва
ул. 2-я Боевская, 2

Представлены результаты исследований волноводных и микрополосковых фотонных кристаллов с электрически управляемыми характеристиками. Предложены конструкции фотонных кристаллов с электрически управляемыми характеристиками на основе микрополосковых линий и волноводов с диэлектрическим заполнением, с резонансными диафрагмами и рамочными элементами, которые могут быть использованы как при создании СВЧ-выключателей и переключателей, модуляторов СВЧ-сигнала, так и высокочувствительных систем для измерения параметров материалов на сверхвысоких частотах.

Ключевые слова: СВЧ фотонные кристаллы, резонансные диафрагмы, $n-i-p-i-n$ -диодная матрица, рамочные элементы, электрически управляемые характеристики.

В последнее время растет интерес к исследованиям нового класса периодических структур, называемых фотонными кристаллами. Эти структуры состоят из периодически расположенных составляющих, размеры которых сравнимы с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения.

СВЧ фотонные кристаллы, обладают свойствами, обеспечивающими возможность создания различных типов СВЧ-устройств, среди которых полосовые фильтры, направленные ответвители, перестраиваемые резонаторы, миниатюрные антенны, согласованные нагрузки [1–8].

Для создания СВЧ фотонных кристаллов использовались прямоугольные и коаксиальные волноводы, микрополосковые, копланарные, щелевые и волноводно-щелевые линии [1; 5; 9–15]. Отличительной особенностью фотонных кристаллов СВЧ-диапазона является высокая технологичность их производства, макроскопичность элементов, составляющих их конструкцию, возможность реализации фотонных кристаллов на основе упорядоченных массивов элементов различной формы и конфигурации.

При наличии дефекта в структуре фотонного кристалла, нарушающего периодичность, в

виде изменения геометрических размеров и/или электрофизических параметров одного или нескольких элементов, в фотонной запрещенной зоне может проявляться резонансная особенность [16], называемая примесной модой колебаний [17].

Изменением параметров создаваемых в фотонном кристалле нарушений, в том числе с использованием температурных [18], электрических [12; 14; 19–22], магнитных [23; 24] полей, возможно управление частотными положениями примесной моды колебаний в запрещенной зоне фотонного кристалла.

В настоящей работе представлены результаты исследований СВЧ фотонных кристаллов в волноводном и микрополосковом исполнении с электрически управляемыми характеристиками.

1. Волноводные фотонные кристаллы с диэлектрическим заполнением с управляемыми характеристиками

В [20] показана возможность создания волноводного фотонного кристалла с перестраиваемым частотным положением окна прозрачности, свя-

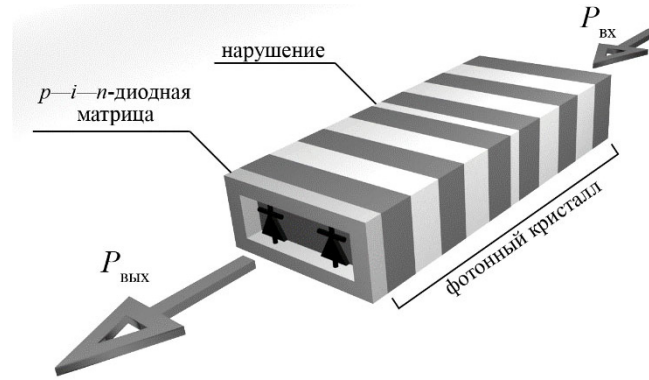


Рис. 1. Расположение фотонного кристалла и $p-i-n$ -диодной матрицы

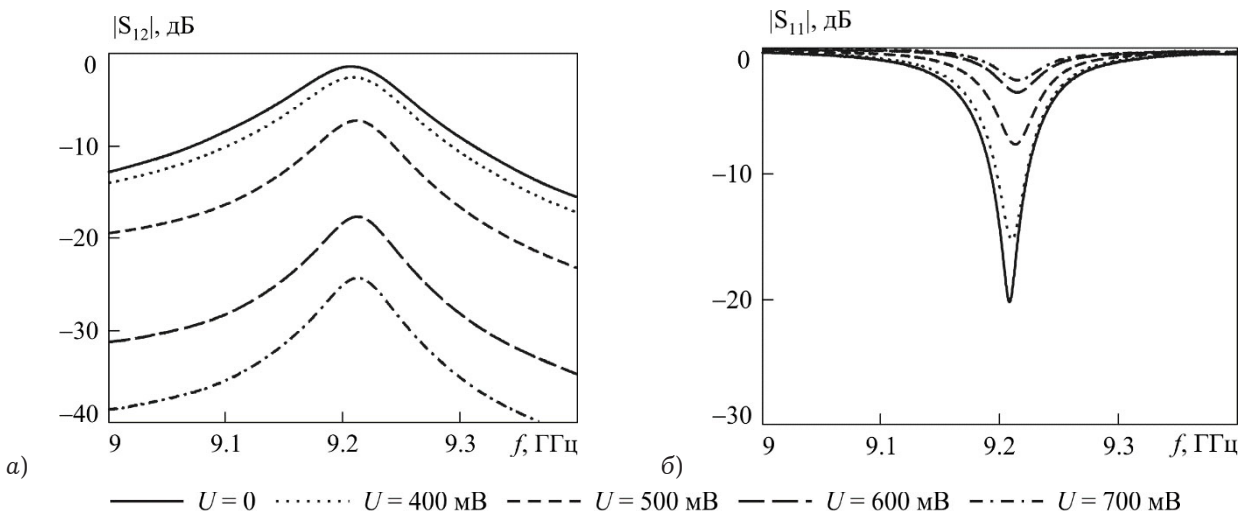


Рис. 2. Экспериментальные зависимости модуля коэффициента прохождения (а) и отражения (б) электромагнитного излучения в области окна прозрачности фотонного кристалла для различных значений величины напряжения на $p-i-n$ -диоде, $d_6 = 5.5$ мм

занного с нарушением периодичности в фотонном кристалле, и управляемым с помощью $p-i-n$ -диодов величиной затухания в этом окне. Был создан 11-слойный СВЧ фотонный кристалл, предназначенный для работы в 3-сантиметровом диапазоне длин волн, представляющий собой 11 чередующихся слоев поликора ($\epsilon = 9.6$) толщиной 1 мм и пенопласта ($\epsilon = 1.1$) толщиной 12 мм. Нарушение периодичности обеспечивалось использованием в качестве шестого слоя пластины из пенопласта уменьшенной толщины.

Для реализации управления величиной пропускания в полосе прозрачности использовалась $p-i-n$ -диодная матрица, которая включалась в волноводный тракт совместно с фотонным кристаллом (рис. 1).

К матрице $p-i-n$ -диодов прикладывалось управляющее напряжение, регулируемое в диапазоне 0–700 мВ. Изображенная на рис. 1 структура размещалась в волноводе трехсантиметрового диапазона и через коаксиально-волноводный переход подключалась к 50-омному

коаксиальному тракту векторного анализатора цепей Agilent PNA-L N5230A. С помощью этого анализатора измерялись частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения. Матрица $p-i-n$ -диодов в отсутствие напряжения смещения вносит слабое возмущение в фотонный кристалл, и его характеристики остаются практически неизменными. С увеличением напряжения смещения это возмущение нарастает в связи с обогащением i -области носителями заряда, и характерное для фотонного кристалла резонансное пропускание уменьшается.

Экспериментальные частотные зависимости $|S_{12}|$ и $|S_{11}|$ приведены на рис. 2 для различных значений напряжения смещения на $p-i-n$ -диоде при толщине нарушенного слоя $d_6 = 5$ мм. Из приведенных на этом рисунке результатов следует, что использование СВЧ фотонного кристалла позволяет создать СВЧ переключатель с электрически регулируемыми характеристиками от -1.5 до -25 дБ при изменении напряжения смещения на $p-i-n$ -диодах от 0 до 700 мВ.

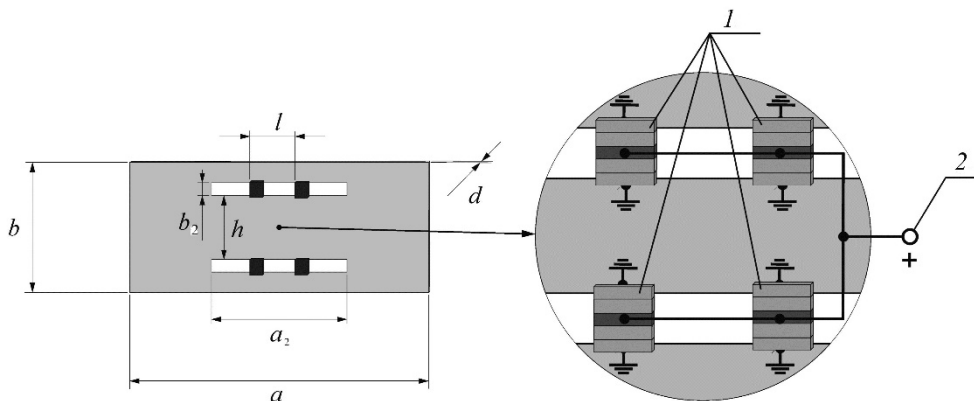


Рис. 3. Конструкция с $n-i-p-i-n$ -диодной матрицей, выполняющей роль нарушения фотонного кристалла: 1 – $n-i-p-i-n$ -диодная матрица; 2 – источник постоянного напряжения

2. Волноводные фотонные кристаллы на резонансных диафрагмах с управляемыми характеристиками

Известно, что резонансные волноводные диафрагмы являются часто применяемыми элементами конструкции аттенюаторов и выключателей на $p-i-n$ -диодах. Малые геометрические размеры щели обеспечивают эффективное взаимодействие полупроводниковых элементов, имеющих малые габариты, с полем волновода, а использование резонансной диафрагмы в измерительных системах позволяет повысить локальность измерений.

Исследуемый фотонный кристалл представлял собой структуру, состоящую из семи периодически расположенных прямоугольных металлических резонансных диафрагм на расстоянии $L = 20$ мм друг от друга в прямоугольном волноводе трехсантиметрового диапазона [25]. Ширина и высота щелей диафрагм фотонного кристалла выбирались равными 20 мм и 2 мм, соответственно.

Для управления резонансными свойствами таких фотонных кристаллов использовалась $n-i-p-i-n$ -диодная матрица, состоящая из четырех диодных элементов, размещенных в центральной диафрагме, выполненной в виде двух прямоугольных щелей. Размеры каждой щели составляли 10.5×1.0 мм². Конструкция с $n-i-p-i-n$ -диодной матрицей, выполняющей роль нарушения фотонного кристалла, представлена на рис. 3.

При расчете полагалось, что полупроводниковая матрица состоит из $n-i-p-i-n$ -структур, имеющих форму параллелепипеда высотой $h = 1$ мм и поперечным сечением 1.0×0.5 мм².

На основе численного моделирования с использованием метода конечных элементов в про-

грамме ANSYS HFSS исследовались амплитудно-частотные характеристики коэффициентов отражения и прохождения фотонного кристалла при различной удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры. Предполагалось, что при прямом смещении удельная электропроводность σ данного элемента изменялась в диапазоне $10^{-2} \dots 10^5$ См/м. Такое изменение величины удельной электропроводности σ , обусловленное обогащением i -областей инжектированными носителями заряда, соответствует величине протекающего тока от 0 до 300 мА при изменении напряжения смещения от 0 до 0.9 В с использованием $n-i-p-i-n$ -структуры типа 2A505.

Результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик фотонного кристалла представлены на рис. 4.

Как следует из результатов расчета фотонный кристалл без нарушений, созданный на основе резонансных диафрагм, характеризуется наличием запрещенной зоны в диапазоне частот 8.53...10.23 ГГц (кривые 1 на рис. 4).

Введение в фотонный кристалл $n-i-p-i-n$ -матрицы в качестве нарушения центрального слоя приводит к возникновению примесной моды колебаний в запрещенной зоне фотонного кристалла на частоте $f_{\text{теор}} = 8.91$ ГГц. Изменение величины удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры от 0 до 10^4 См/м приводит к монотонному уменьшению коэффициента прохождения на частоте примесной моды колебаний от -0.65 дБ до -40.6 дБ. При этом в изменении коэффициента отражения наблюдается особенность: при увеличении удельной электропроводности i -слоя в диапазоне от 0.4 до 10^4 См/м монотонно увеличивается от -47.5 дБ до -0.3 дБ.

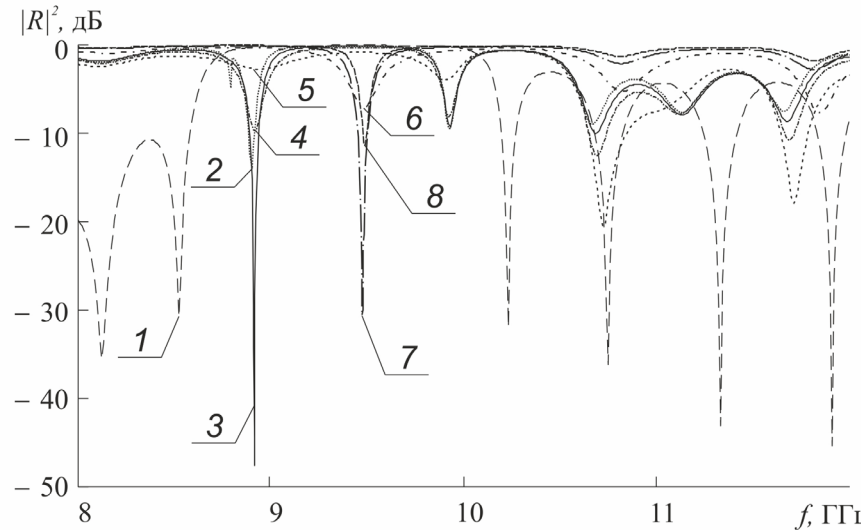


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения фотонного кристалла: 1 – фотонный кристалла без нарушений из 7 диафрагм без $n-i-p-i-n$ -матрицы; 2–8 – фотонный кристалл с управляющей $n-i-p-i-n$ -матрицей в качестве нарушения центрального слоя при различной удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры σ , См/м: 2–0, 3–1.0, 4–2.0, 5–10.0, 6–100.0, 7–1000.0, 8–10000.0

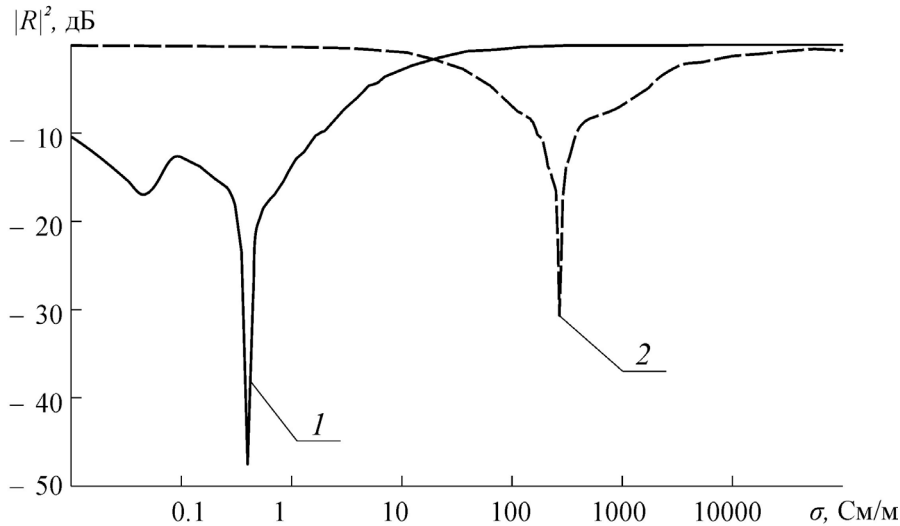


Рис. 5. Зависимости коэффициента отражения от величины удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры на частотах примесных мод колебаний фотонного кристалла $f_{1\text{теор}}$ и $f_{2\text{теор}}$, ГГц: 1 – 8.91; 2 – 9.47

Увеличение удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры до значений больших 20.0 См/м приводит к исчезновению примесной моды колебаний на частоте $f_{1\text{теор}}$ и возникновению на частоте $f_{2\text{теор}} = 9.47$ ГГц, отличной от $f_{1\text{теор}}$.

Частотные зависимости коэффициента отражения фотонного кристалла демонстрируют высокую чувствительность к величине удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры. При этом на частотах $f_{1\text{теор}}$ и $f_{2\text{теор}}$ могут быть получены как монотонно возрастающие или монотонно убывающие, так и немонотонные зависимости коэффициента отражения от величины удельной электропроводности i -слоя выбором диапазона ее изменения (см. рис. 5).

Исчезновение примесной моды колебаний на частоте $f_{1\text{теор}}$ и возникновение на другой частоте $f_{2\text{теор}}$ при увеличении удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры до определенной величины обусловлено эффектом изменения типа резонансного отражения электромагнитного излучения от слоистых структур с проводящими слоями [26] от, так называемого, полуволнового резонанса, к четвертьволновому резонансу.

Экспериментально исследовался фотонный кристалл, созданный в соответствии с описанной выше моделью и состоящий из семи алюминиевых резонансных диафрагм толщиной 10 мкм, расстояние между которыми выбиралось равным 20 мм и фиксировалось с помощью слоя пено-

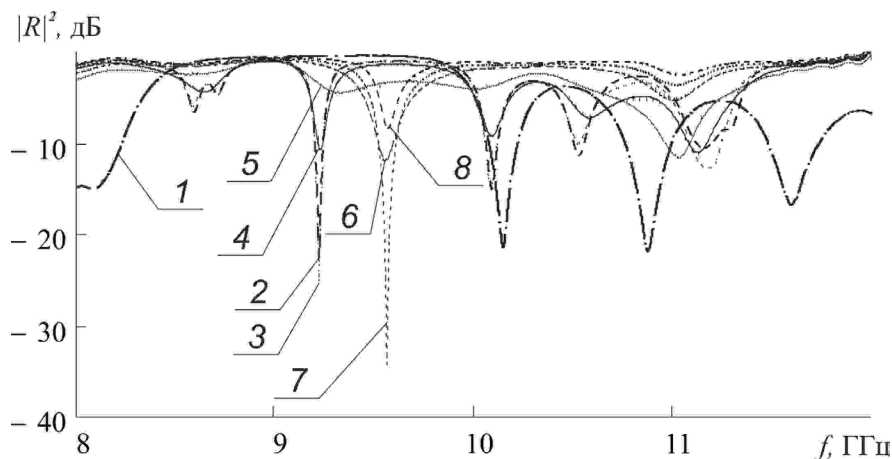


Рис. 6. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента отражения фотонного кристалла: 1 – фотонный кристалла без нарушений из 7 диафрагм без $n-i-p-i-n$ -матрицы; 2–8 – фотонный кристалл с управляющей $n-i-p-i-n$ -матрицей в качестве нарушения центрального слоя при различных значениях управляющего тока I , мА: 2 – 0.0, 3 – 0.0005, 4 – 0.092, 5 – 0.660, 6 – 3.36, 7 – 8.15, 8 – 193.5

пласта, полностью заполняющего поперечное сечение прямоугольного волновода. В фотонном кристалле в центральной диафрагме в качестве нарушения с управляемыми характеристиками была размещена $n-i-p-i-n$ -матрица из диодов типа 2A505.

Как следует из результатов эксперимента фотонный кристалл без нарушений, созданный на основе резонансных диафрагм, характеризуется наличием запрещенной зоны в диапазоне частот 8.14...10.14 ГГц (кривая 1 на рис. 6).

Введение в фотонный кристалл $n-i-p-i-n$ -матрицы в качестве нарушения центрального слоя приводит к возникновению примесной моды колебаний в запрещенной зоне фотонного кристалла на частоте $f_{1эксп} = 9.22$ ГГц. Изменение величины управляющего тока $n-i-p-i-n$ -структуры от 0 до 0.5 мкА приводит к уменьшению коэффициента отражения на частоте примесной моды колебаний $f_{1эксп}$ от -22.5 дБ до -25.2 дБ. Дальнейшее увеличение управляющего тока приводит к монотонному увеличению коэффициента отражения на частоте $f_{1эксп}$ до -0.61 дБ. При этом коэффициент прохождения во всем диапазоне управляющих токов монотонно уменьшался от -3.42 дБ до -35.0 дБ.

Увеличение тока, протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру, до значений больших 1.0 мА приводило к исчезновению примесной моды колебаний на частоте $f_{1эксп}$ и возникновению на частоте $f_{2эксп} = 9.56$ ГГц, отличной от $f_{1эксп}$. При этом на частоте $f_{2эксп}$ с увеличением протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру тока в диапазоне от 0.0 См/м до 8.15 мА коэффициент отражения уменьшается от -0.1 дБ до -48.64 дБ (кривая 7 на рис. 6).

3. Волноводные структуры с запрещенными зонами, созданные на основе рамочных элементов с электрически управляемыми характеристиками

Как известно, свойствами фотонного кристалла такими, как наличие запрещенной и разрешенной зон, обладают структуры кольцевого типа. Зонный характер спектра в таких структурах достигается вследствие многократного отражения от неоднородности в структуре. Такие устройства в микрополосковом исполнении приведены в [27; 28]. В [21] приведены характеристики такого рода структур в волноводном исполнении. В качестве неоднородности в них используется элемент типа «металлический штырь с зазором». Эта неоднородность обеспечивает появление резонансной особенности в запрещенной зоне исследуемой системы, называемой дефектной модой колебаний или «окном прозрачности». Соответственно в разрешенной зоне (полосе пропускания) может возникать пик запираения. На рис. 7 приведена конструкция СВЧ-элемента на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов с неоднородностью типа «штырь с зазором», расположенной на расстоянии 20 мм справа от диафрагмы и полупроводниковой $n-i-p-i-n$ -структурой, расположенной в зазоре между штырем и рамочным элементом.

Результаты расчета АЧХ коэффициента отражения (кривая 1) и прохождения (кривая 2) вблизи пика запираения в разрешенной зоне приведены на рис. 8. Из полученных результатов следует, что изменение величины удельной

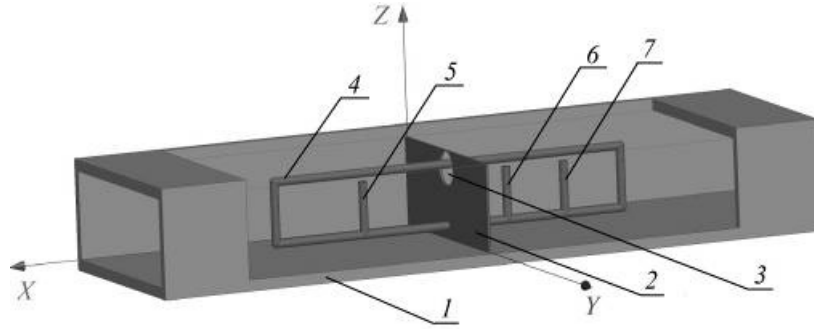


Рис. 7. Модель СВЧ-элемента на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, содержащей неоднородность в виде конструкций типа «штырь с зазором»: 1 – волновод; 2 – диафрагма; 3 – отверстие; 4 – рамочный элемент; 5–7 – неоднородности типа «штырь с зазором»

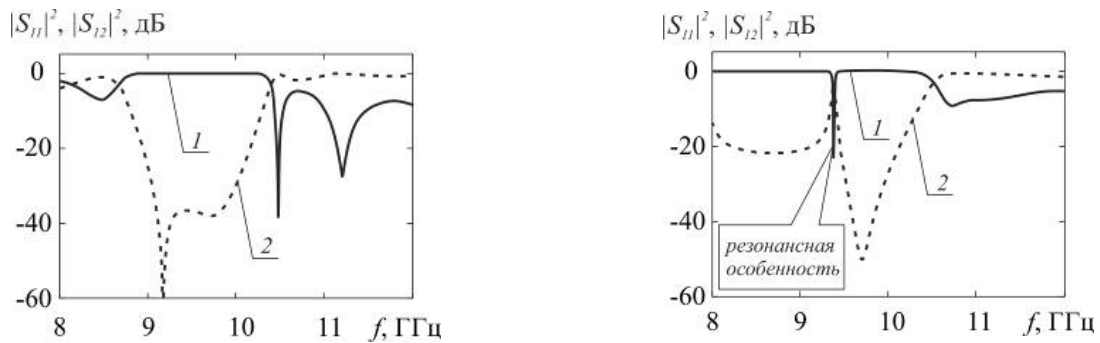


Рис. 8. Расчетные частотные зависимости коэффициента отражения (кривые 1) и коэффициента прохождения (кривые 2) СВЧ-устройства на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов: а) несодержащей неоднородности; б) содержащей неоднородности типа «штырь с зазором»

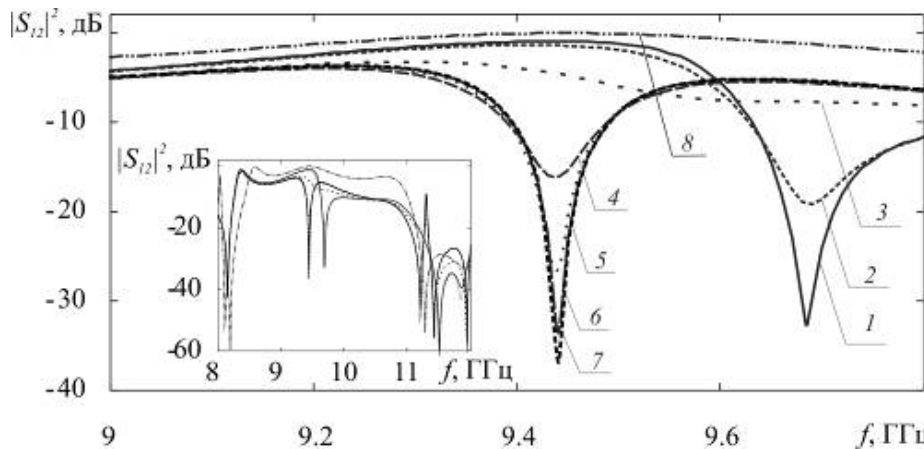


Рис. 9. Расчетные амплитудно-частотные характеристики коэффициента прохождения вблизи пика запираения разрешенной зоны СВЧ-элемента с неоднородностью типа «штырь с зазором» и $n-i-p-i-n$ -структурой: 1 – $\sigma = 10^{-3}$ См/м; 2 – $\sigma = 1.0$ См/м; 3 – $\sigma = 10.0$ См/м; 4 – $\sigma = 10^2$ См/м; 5 – $\sigma = 10^3$ См/м; 6 – $\sigma = 10^4$ См/м; 7 – $\sigma = 10^5$ См/м; 8 – случай отсутствия штыря и управляющего элемента

электропроводности управляющего элемента от 10^{-3} до 10^5 См/м приводит к изменению коэффициента прохождения на частоте 9.44 ГГц, соответствующей пику запираения, в диапазоне значений $-36.79 \dots -1.01$ дБ. При этом положение пика запираения изменяется от 9.69 до 9.44 ГГц.

Экспериментально была исследована система из двух рамочных элементов длиной 21 мм каждый. Штырь с зазором располагался на расстоянии 14 мм справа от плоскости диафрагмы. Экспериментальные АЧХ $|S_{11}|^2$ вблизи пика

пропускания запрещенной зоны приведены на рис. 9. На вставке – те же результаты в диапазоне частот 8–12 ГГц. Для получения пика запираения в разрешенной зоне штырь с зазором и $n-i-p-i-n$ -структурой располагался на расстоянии 20 мм справа от плоскости диафрагмы. Подача напряжения смещения в диапазоне 0–9 В приводила к изменению коэффициента прохождения от -25 дБ до -1.5 дБ на частоте 9.644 ГГц, при этом положение пика изменилось от 10.079 ГГц до 9.644 ГГц.

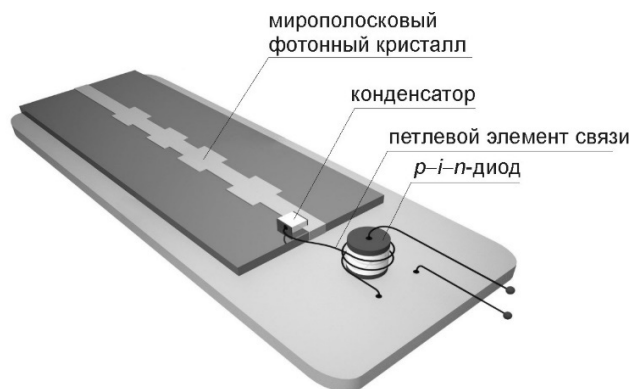


Рис. 10. Микрополосковый фотонный кристалл с подключенной резонансной системой из конденсатора, петлевого элемента связи и $p-i-n$ -диода

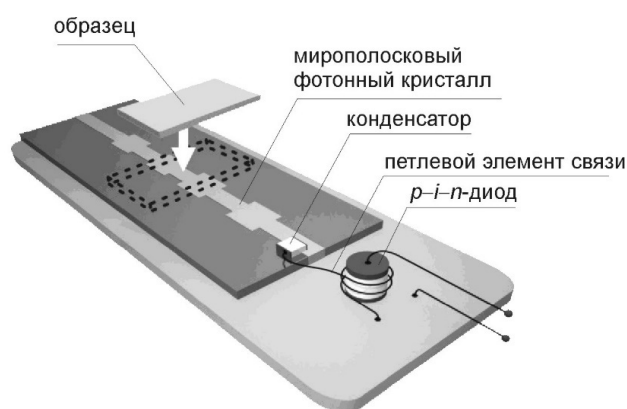


Рис. 11. Микрополосковый фотонный кристалл с подключенной резонансной системой в виде конденсатора и петлевого элемента связи, в центре которого расположен $p-i-n$ -диод, с образцом, расположенным непосредственно на фотонной структуре

4. Микрополосковые фотонные кристаллы с электрически управляемыми характеристиками

Рассматривались микрополосковые фотонные кристаллы СВЧ-диапазона, реализованные на основе микрополосковой линии передачи с периодически изменяющейся шириной полоскового проводника и содержащие нарушения периодичности в виде изменения длины одного из отрезков микрополосковой линии [29].

В работе [22] экспериментально исследовались частотные зависимости потерь затухания на отражение электромагнитного излучения, взаимодействующего с микрополосковым фотонным кристаллом, нагруженным на резонансную систему в виде конденсатора и петлевого элемента связи, в центре которого расположен $p-i-n$ -диод (рис. 10). Резонансная система в такой структуре выполняет функцию нарушения периодичности фотонной структуры, изменяя ее амплитудно-частотные характеристики.

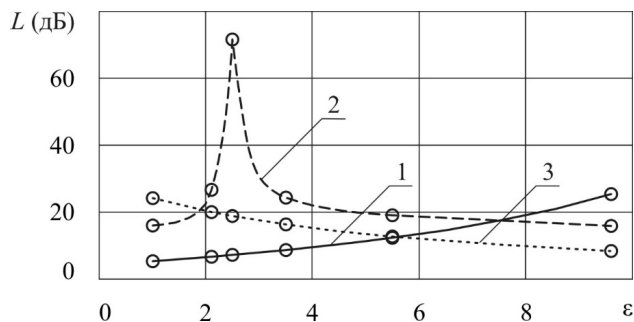


Рис. 12. Зависимости потерь затухания на отражение от диэлектрической проницаемости образца, полученные при управляющем токе $I = 0,046$ мА на различных частотах: кривая 1 – $f = 6,655$ ГГц; кривая 2 – $f = 6,699$ ГГц; кривая 3 – $f = 6,715$ ГГц

Микрополосковая фотонная структура с резонансной системой демонстрирует высокую чувствительность амплитудно-частотных характеристик потерь затухания на отражение к величине протекающего через $p-i-n$ -диод прямого тока. Наиболее заметное влияние управляющего тока на величину потерь затухания можно наблюдать в диапазоне 6,5–7 ГГц. В указанном диапазоне рассматриваемая структура демонстрирует два максимума потерь затухания, частота и амплитуда которых меняется при изменении управляющего тока. При этом на частоте ~ 6,9 ГГц может быть реализован как прямой, так и инверсный режим переключения потерь затухания на отражение с максимальным значением более 60 дБ. В то время как на частоте ~ 6,7 ГГц реализуется инверсный режим переключения.

Рассматривалось изменение амплитудно-частотных характеристик потерь затухания при расположении на фотонной структуре образцов с различной диэлектрической проницаемостью.

При этом образцы располагались так, как показано на рис. 11, непосредственно на фотонной структуре, над одним из ее отрезков, который выполняет роль нарушения фотонной структуры.

Частотные зависимости потерь затухания демонстрирует высокую чувствительность к величине диэлектрической проницаемости образца, размещенного на фотонной структуре. При этом выбором рабочей частоты и величины тока I , протекающего через $p-i-n$ -диод, могут быть получены как монотонно возрастающие или монотонно убывающие зависимости потерь затухания на отражение от диэлектрической проницаемости образца, так и зависимости, характеризующиеся наличием максимума при определенном значении ϵ (рис. 12).

Заключение

Таким образом, представлены результаты исследований волноводных и микрополосковых фотонных кристаллов с электрически управляемыми характеристиками.

Приведены конструкции волноводных структур с управляемыми электрическим полем характеристиками на основе волноводов с диэлектрическим заполнением, с резонансными диафрагмами и рамочными элементами.

Описана конструкция микрополоскового фотонного кристалла с подключенной резонансной системой в виде конденсатора и петлевого элемента связи, в центре которого расположен $p-i-n$ -диод.

Предложенные конструкции фотонных кристаллов могут быть использованы как при создании СВЧ-выключателей и переключателей, модуляторов СВЧ-сигнала, так и высокочувствительных систем для измерения параметров материалов на сверхвысоких частотах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ).

Список литературы

- Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopoulos N.G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. Vol. 49. № 2. P. 297–306.
- Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals // Progress in Electromagnetics Research. 2003. Vol. 41. P. 185–209.
- On one- and two-dimensional electromagnetic band gap structures in rectangular waveguides at microwave frequencies / A. Gomez [et al.] // Electromagnetics. 2005. Vol. 25. № 5. P. 437–460.
- Burns G.W., Thayne I.G., Arnold J.M. Improvement of planar antenna efficiency when integrated with a millimetre-wave photonic // Proc. of European Conference on Wireless Technology. Amsterdam, Netherlands, 11–12 October 2004. P. 229–232.
- Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах // ДАН. 2005. Т. 400. № 2. С. 181–185.
- Согласованные нагрузки сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн на СВЧ фотонных кристаллах / Д.А. Усанов [и др.] // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. Вып. 2. С. 216–220.
- Photonic crystal at millimeter waves applications / H.C.C. Fernandes [et al.] // PIERS Online. 2007. Vol. 3. № 5. P. 689–694.
- Saib A., Huynen I. Periodic metamaterials combining ferromagnetic nanowires and dielectric structures for planar circuits applications // Electromagnetics. 2006. Vol. 26. № 3–4. P. 261–277.
- Defect modes in coaxial photonic crystals / G.J. Schneider [et al.] // Journal of Applied Physics. 2001. V. 90. № 6. P. 2642–2649.
- Coaxial cable Bragg gratings / T. Wei [et al.] // Applied Physics Letters. 2011. V. 99. P. 113517–1–3.
- Коаксиальные Брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах / Г.А. Морозов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 3. С. 65–70.
- Электрически перестраиваемый фотонный кристалл на основе копланарного волновода с наноразмерной сегнетоэлектрической пленкой / В.М. Мухортов [и др.] // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 20. С. 70–76.
- Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей / Д.А. Усанов [и др.] // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 143–148.
- Сверхвысокочастотный фотонный кристалл на целевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой / Ал.А. Никитин [и др.] // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 6. С. 115–120.
- Брэгговские сверхвысокочастотные структуры на волноводно-целевых линиях / Д.А. Усанов [и др.] // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 4. С. 321–326.
- Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. Donor and acceptor modes in photonic band structure // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67. № 24. P. 3380–3383.
- Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф. Исследование добротности резонанса примесной моды в микрополосковой модели одномерного фотонного кристалла // ДАН. 2005. Т. 403. № 3. С. 319–324.
- Термооптическое переключение в одномерном фотонном кристалле / В.А. Гуняков [и др.] // ПЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 21. С. 76–83.
- Мухортов В.М., Масычев С.И., Тимошенко П.Е. Микрополосковый перестраиваемый фотонный кристалл с периодической структурой из кольцевых резонаторов, сформированных на поверхности сегнетоэлектрической гетероструктуры (Ba, Sr)TiO₃/MgO // Вестник Южного научного центра. 2016. Т. 12. № 3. С. 11–16.
- Волноводные фотонные кристаллы с характеристиками, управляемыми $p-i-n$ -диодами / Д.А. Усанов [и др.] // Известия вузов. Электроника. 2010. № 1. С. 24–29.
- Волноводы, содержащие рамочные элементы с электрически управляемыми характеристиками разрешенных и запрещенных зон / Д.А. Усанов [и др.] // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. № 11. С. 1079–1084.
- Управляемые pin -диодами фотонные кристаллы и их применение / Д.А. Усанов [и др.] // Антенны. 2012. № 3. С. 9–14.

23. Управление пропусканием многослойного фотонного кристалла с жидкокристаллическим дефектом с помощью магнитного поля / В.А. Гуняков [и др.] // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 10. С. 95–100.
24. Investigating the use of magnonic crystals as extremely sensitive magnetic field sensors at room temperature / M. Inoue [и др.] // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. P. 132511-1–3.
25. Волноводные фотонные структуры на резонансных диафрагмах / Д.А. Усанов [и др.] // Радиотехника. 2015. № 10. С. 108–113.
26. Изменение типа резонансного отражения электромагнитного излучения в структурах нанометровая металлическая пленка – диэлектрик / Д.А. Усанов [и др.] // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 2. С. 13–22.
27. Characteristics of microwave filters based on microstrip photonic bandgap ring structures / S.-I. Kim [et al.] // Current Applied Physics. 2005. № 5. P. 619–624.
28. Tuning and widening of stop bands of microstrip photonic band gap ring structures / C.-S. Kee [et al.] // Applied Physics Letters. 2005. Vol. 86. P. 181109.
29. Фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов / Д.А. Усанов [и др.] // Известия вузов. Электроника. 2008. № 5. С. 25–32.

Microwave photonic crystals with electrically controlled characteristics

*D.A. Usanov, S.A. Nikitov, A.V. Skripal,
M.K. Merdanov, S.G. Evteev, A.P. Frolov*

The results of investigations of waveguide and microstrip photonic crystals with electrically controlled characteristics have been presented. The designs of photonic crystals with electrically controlled characteristics based on microstrip lines and waveguides with dielectric filling, with resonant diaphragms and frame elements, which can be used both for the creation of microwave switches, selectors, signal modulators, and high-sensitivity systems for measuring materials parameters at microwaves have been proposed.

Keywords: microwave photonic crystals, resonant diaphragms, $n-i-p-i-n$ -diode matrix, frame elements, electrically controlled characteristics.

Неганов, В.А.

Теория и применение устройств СВЧ: учебн. пособие для вузов / В.А. Неганов, Г.П. Яровой; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радио и связь, 2006. – 720 с.



ISBN 5-256-01812-4

УДК 621.396.67

ББК 32.840

Н 41

В учебном пособии рассматриваются методы проектирования и конструктивной реализации устройств СВЧ: линий передачи различных видов, резонаторов, согласующих и трансформирующих устройств, фильтров, фазовращателей, аттенуаторов, тройниковых соединений, направленных ответвителей, различных мостовых соединений, ферритовых устройств (вентилей, циркуляторов, фазовращателей) и СВЧ-устройств на полупроводниковых диодах (умножителей, смесителей, переключателей, выключателей). Приводятся примеры применения устройств СВЧ в радиосвязи, радиолокации, измерительной аппаратуре и т. д. В книгу вошел оригинальный материал, полученный авторами. Учебное пособие может использоваться как справочник по устройствам СВЧ.

Для специалистов в области теории и техники СВЧ, преподавателей вузов, докторантов, аспирантов, студентов старших курсов радиотехнического и радиофизического профиля.