
**РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ И ПЛАЗМЕ**

УДК 621.372.2

**ВОЛНОВОДНЫЕ ФИЛЬТРЫ ЗАГРАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ
С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, УПРАВЛЯЕМЫМИ $n-i-p-i-n$ -ДИОДАМИ**

© 2019 г. Д. А. Усанов¹, *, С. А. Никитов², А. В. Скрипаль¹,
М. К. Мерданов³, С. Г. Евтеев¹, Д. В. Пономарев¹

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,
Российская Федерация, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83

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

³НПО “Электронное приборостроение”,
Российская Федерация, 107014 Москва, ул. 2-я Боевская, 2

*E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

Поступила в редакцию 07.06.2018 г.

После доработки 04.07.2018 г.

Принята к публикации 06.07.2018 г.

Показана возможность использования отражательных свойств фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и резонансными диафрагмами в схеме с Y -циркулятором для реализации системы, обладающей разрешенной зоной с частотно-независимой передаточной характеристикой, близкой к единице. Подтверждено существование примесных мод затухания колебаний в разрешенной зоне такого фотонного кристалла с нарушением периодичности. С использованием фотонных кристаллов на резонансных диафрагмах реализованы фильтры заграждения с характеристиками, управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами; фильтры обладают уровнем запирания в полосе заграждения более 43.0 дБ и потерями вне полосы менее 0.8 дБ.

DOI: 10.1134/S0033849419040107

ВВЕДЕНИЕ

Периодические структуры с запрещенной зоной в СВЧ-диапазоне, часто называемые фотонными СВЧ-кристаллами, обладают свойствами, обеспечивающими возможность создания различных типов СВЧ-устройств, среди которых перестраиваемые резонаторы, направленные ответвители, миниатюрные антенны, согласованные нагрузки, различные типы СВЧ-фильтров, в том числе с управляемыми характеристиками [1–9].

СВЧ-фильтры являются важными компонентами современных радиолокационных систем и систем спутниковой связи. Наряду с полосовыми фильтрами [6, 10–16], предназначенными для распространения сигналов на выбранных частотах, фильтры заграждения необходимы для подавления нежелательных ложных сигналов, субгармоник и более высоких гармоник. Современные СВЧ-фильтры заграждения должны характеризоваться наряду с высоким коэффициентом ослабления в выбранной полосе частот также коэффициентом прохождения электромагнитного излучения, близким к единице вне полосы заграждения. Такие фильтры выполняются как с использованием раз-

личных типов планарных линий передачи, так и в волноводном исполнении [17–25].

Для создания фильтров заграждения использовали диэлектрические пластины с четвертьволновыми резонаторами [17] и с резонаторами в виде расщепленного кольца [26], размещенные в E -плоскости прямоугольного волновода X -диапазона с полосой заграждения ~ 680 МГц на уровне -3 дБ и уровнем запирания не хуже -15 дБ.

В ряде работ [18, 19] для реализации фильтра заграждения предложено располагать диэлектрические пластины как с четвертьволновыми резонаторами, так и с резонаторами в виде расщепленного кольца в H -плоскости прямоугольного волновода X -диапазона.

Авторами работы [20] с использованием резонаторов, связанных между собой посредством линии передачи на основе двухгребневого волновода (H -образные волноводы), реализован фильтр заграждения на рабочей частоте 12 ГГц с полосой заграждения 680 МГц. Для достижения требуемого уровня согласования в полосе пропускания между резонаторами были использованы многосекционные импедансные инверторы.

Для реализации фильтра заграждения на основе микрополосковой линии в работе [21] использовался планарный спиральный резонатор, расположенный вблизи верхнего полосока микрополосковой линии. Полоса заграждения фильтра заграждения на уровне -10 дБ достигает 2.32 ГГц, вне полосы заграждения достигнутый коэффициент прохождения не превышает -5 дБ.

Для обеспечения компактности СВЧ-фильтров заграждения используется так называемая дефектная структура заземления [22]. Так, например, в работе [23] предложен новый копланарный волноводный фильтр заграждения с двойными шпилевидными структурами на плоскостях заземления, выполняющими роль дефектов в области заземления копланарной линии передачи. Предложенный фильтр заграждения обеспечивает достаточно узкую область запирания (0.221 ГГц на уровне -3 дБ) при коэффициенте затухания ~ 40 дБ.

В последние несколько десятилетий получила широкое развитие техника волноводно-щелевых линий (ВЩЛ) для создания устройств в сантиметровых и миллиметровых системах. Фильтры заграждения на основе ВЩЛ имеют ряд преимуществ: их легко интегрировать в системы; их вносимые потери ниже по сравнению с полосовыми фильтрами на ВЩЛ. В случае подавления нежелательных сигналов с узкой полосой более предпочтительными являются фильтры заграждения, а не полосовые фильтры. Для обеспечения более широкой полосы подавления ~ 600 МГц на уровне -20 дБ фильтров на ВЩЛ U-диапазона при сохранении их размеров используются многочастотные щелевые резонаторы, встроенные в “плавники” щелевой линии [24].

На основе коммутации волноводных фильтров в [25] разработаны электрически управляемые переключатели типа заграждения, где плоский резонатор, расположенный на узкой боковой стенке прямоугольного волновода, изготовлен на кварцевой подложке. Резонатор имеет два металлических слоя и один диэлектрический. Резонатор расположен на первом металлическом слое, а консольные балки RF MEMS – на втором. Планарная схема имеет два рабочих состояния. Первое – верхняя и нижняя половины резонатора разомкнуты, резонанс при возбуждении всей структуры в исследуемом диапазоне частот волной типа TE_{10} отсутствует, коэффициент прохождения волны максимален. Второе состояние – верхняя и нижняя половины резонатора электрически замкнуты, плоский резонатор возбуждается и реализуется режим запирания на фиксированной частоте в рабочем диапазоне частот. Ширина полосы подавления на уровне -14 дБ достигает 500 МГц в Ku-диапазоне при прямых потерях менее 0.3 дБ вне полосы.

Наличие явно выраженных запрещенных зон на характеристиках СВЧ фотонных кристаллов (ФК) позволяет использовать их в качестве полосовых фильтров заграждения, однако вне полосы заграждения (в области разрешенных зон) коэффициент прохождения имеет “изрезанную”, т.е. частотно-зависимую характеристику. Фотонные кристаллы с нарушением периодичности структуры позволяют реализовать узкополосные фильтры пропускания [27], однако при реализации узкополосных фильтров заграждения на основе ФК с малой шириной запрещенной зоны коэффициент ослабления в полосе заграждения незначителен.

В случае реализации системы на основе ФК с плоской разрешенной зоной, т.е. зоной, характеризующейся частотно-независимым коэффициентом прохождения электромагнитной волны, близким к единице, могут быть созданы узкополосные фильтры заграждения, обладающие вне полосы заграждения частотно-независимым коэффициентом прохождения, близким к единице.

Задача получения плоской разрешенной зоны в ФК может быть решена с помощью значительного увеличения числа периодически чередующихся элементов при слабом отличии их диэлектрических проницаемостей или с помощью процедуры аподизации [28, 29]. Это приводит в определенной мере к нарушению условий интерференции в ФК, снижению добротности резонансных состояний, образующих разрешенную зону и, как следствие, к сглаживанию частотной характеристики в области разрешенной зоны. К недостаткам процедуры аподизации можно отнести следующие: ее эффективность повышается с увеличением числа элементов ФК, что ведет к увеличению размеров устройств; ужесточаются требования к технологическому процессу создания ФК с элементами, электрофизические параметры которых изменяются по определенному закону. Кроме того, следует отметить определенное уменьшение коэффициента прохождения при сглаживании амплитудно-частотных характеристик (АЧХ).

Отличительной особенностью ФК СВЧ-диапазона является высокая технологичность их производства, макроскопичность элементов, составляющих их конструкцию, возможность реализации ФК на основе упорядоченных массивов элементов различной формы и конфигурации [1, 6, 30–36]. В связи с этим несомненный научный и практический интерес представляет реализация системы на основе ФК с примесной модой затухания колебаний в разрешенной зоне ФК, обеспечивающей создание как широкополосных, так и узкополосных фильтров заграждения с электрически управляемыми АЧХ в широком диапазоне значений.

1. МОДЕЛЬ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

В качестве волноводного ФК был рассмотрен отрезок волновода со структурой, представляющей собой периодически чередующиеся слои двух типов диэлектриков с различными значениями толщины и диэлектрической проницаемости.

Рассматривались одномерные волноводные ФК, составленные из 11 и 15 слоев в диапазоне частот 8...12 ГГц. Нечетные слои были выполнены из тефлона ($\epsilon = 2.1$), четные – из пеноплат ($\epsilon = 1.03$). Длина нечетных и четных отрезков – 4.15 и 12.7 мм соответственно. Нарушение создавалось посредством изменения длины центрального слоя. Длина центрального нарушенного слоя L выбиралась равной 5 и 27 мм.

Для расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны при ее нормальном падении на такую многослойную структуру (рис. 1) использовали матрицу передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны [37–39].

Коэффициенты отражения R и прохождения D электромагнитной волны, взаимодействующей со слоистой структурой, определяли через элементы матрицы передачи T_N с помощью соотношений

$$R = -\frac{T_N [2,1]}{T_N [2,2]}, \quad (1)$$

$$D = \frac{T_N [1,1]T_N [2,2] - T_N [1,2]T_N [2,1]}{T_N [2,2]},$$

где

$$T_N = \begin{pmatrix} T_N [1,1] & T_N [1,2] \\ T_N [2,1] & T_N [2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 T_{j,(j+1)} = T(z_{N,N+1})T(z_{N-1,N}) \dots T(z_{1,2})T(z_{0,1}) \quad (2)$$

матрица передачи слоистой структуры, состоящей из N слоев.

Как известно, СВЧ ФК характеризуются наличием так называемых запрещенных зон, представляющих собой отдельные диапазоны частот, в которых электромагнитные волны распространяются с затуханием. Важным свойством ФК является высокий коэффициент отражения электромагнитной волны от ФК в диапазоне частот, соответствующем запрещенной зоне, т.е. ФК обладает свойствами зеркала для электромагнитного излучения СВЧ-диапазона. Именно отражательные свойства ФК и могут быть использованы для реализации системы на основе фотонного

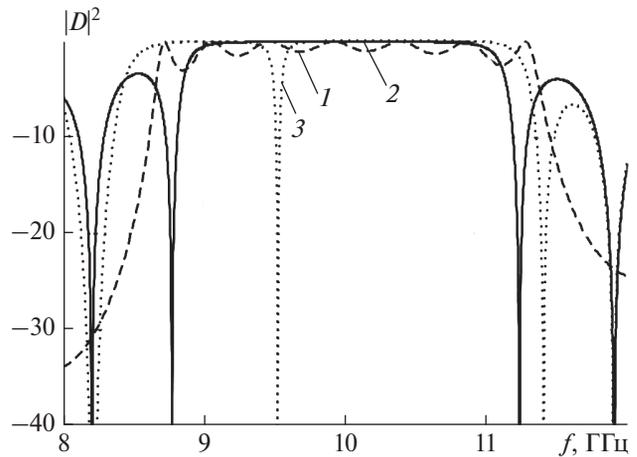


Рис. 1. Расчетные частотные зависимости коэффициента прохождения $|D|^2$ электромагнитной волны в разрешенной зоне СВЧ ФК с диэлектрическим заполнением: 1 – ФК в схеме без Y -циркулятора, 2 – ФК без нарушения в схеме с Y -циркулятором, 3 – ФК с измененной длиной центрального слоя $L = 27$ мм в схеме с Y -циркулятором.

кристалла, обладающей разрешенной зоной с частотно-независимым коэффициентом прохождения, близким к единице.

Возникновение дефектной моды в запрещенной зоне ФК означает, что на определенной частоте электромагнитное излучение может распространяться без затухания и отсутствует отраженная волна. Таким образом, ФК с нарушением периодичности становится зеркалом, не отражающим электромагнитное излучение на отдельной частоте, соответствующей частоте дефектной моды. Использование отражательных свойств такого ФК позволяет вырезать из широкополосного спектра отражения узкие области частот, в которых отсутствует электромагнитное излучение. Таким способом можно создавать узкополосные фильтры заграждения, характеризующиеся значительным подавлением сигнала в полосе заграждения и обладающие вне полосы заграждения частотно-независимым коэффициентом прохождения близким к единице.

Как было отмечено выше, коэффициент прохождения электромагнитной волны в разрешенной зоне СВЧ ФК имеет “изрезанную” частотную характеристику (см. рис. 1 кривая 1). Уменьшение изрезанности может быть достигнуто увеличением числа ячеек ФК, однако при этом увеличиваются потери пропускания в реальных структурах. Эта проблема может быть решена с помощью использования Y -циркулятора, в одно из плеч которого включен ФК (рис. 2). В такой системе коэффициент прохождения электромагнитной волны будет

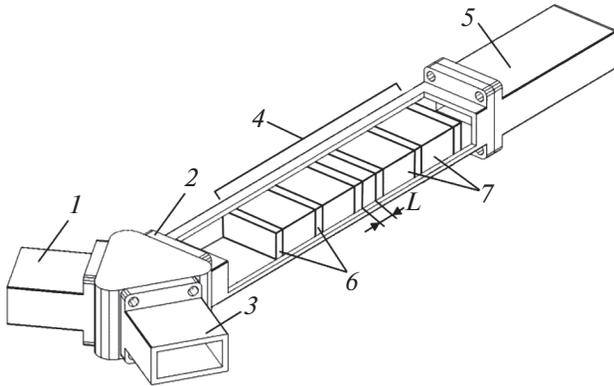


Рис. 2. Фотонный кристалл с диэлектрическим заполнением в схеме на отражение с Y -циркулятором: 1 – вход Y -циркулятора, 2, 3 – выходы Y -циркулятора, 4 – фотонный кристалл, 5 – согласованная нагрузка, 6 – слой фторопласта, 7 – слой пенопласта, L – длина нарушенного слоя.

мало отличаться от единицы даже при сравнительно небольшом числе ячеек (см. рис. 1 кривая 2).

Входной сигнал подавался на вход 1 Y -циркулятора, к выходу 2 был подключен ФК 4 с согласованной нагрузкой 5, выходной сигнал измерялся на выходе 3.

При подаче сигнала на вход 1 идеального Y -циркулятора сигнал на выход 3 поступает только при наличии отраженной волны на выходе 2, поэтому при подключении ФК с согласованной нагрузкой на выходе 2, коэффициент прохождения $|D|^2$ сигнала с входа 1 на выход 2 определяется коэффициентом отражения ФК $|R|^2$, с использованием соотношения

$$|D|^2 = |R|^2. \quad (3)$$

Таким образом, в области частот, определяющих запрещенную зону ФК, $|R|^2 \approx 1$, согласно выражению (3) коэффициент прохождения $|D|^2$ сигнала с входа 1 на выход 3 близок к единице, что обеспечивает формирование разрешенной зоны с частотно-независимым коэффициентом прохождения электромагнитного излучения. Результаты расчета АЧХ коэффициента прохождения сигнала представлены на рис. 1.

Как следует из результатов расчета, частотная зависимость коэффициента прохождения сигнала из плеча 1 в плечо 3 Y -циркулятора с ФК в схеме на отражение характеризуется наличием плоской разрешенной зоны в диапазоне частот 9.0...11.0 ГГц (см. рис. 1 кривая 2), т.е. зоны с частотно-независимым коэффициентом прохождения, равным $|D|^2 \approx 1$.

Создание нарушения в виде изменения длины центрального слоя ФК приводит к возникновению резонансной особенности – примесной мо-

ды затухания колебаний в разрешенной зоне ФК на частоте $f_{\text{теор}} = 9.526$ ГГц. Вне резонансной особенности разрешенная зона расширяется и остается плоской с коэффициентом прохождения, близким к 1.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментально исследован ФК, созданный в соответствии с моделью, представленной на рис. 2. Фотонный кристалл состоял из 15 слоев в диапазоне частот 8...12 ГГц, нечетные слои выполнены из тефлона ($\epsilon = 2.1$), четные – из пенопласта ($\epsilon = 1.03$), длина центрального слоя $L = 5$ и 27 мм.

Передаточные характеристики $|D|^2$ исследуемых ФК измеряли в схеме с Y -циркулятором (см. рис. 2) с помощью векторного анализатора цепей Agilent Microwave Network Analyzer N5242A PNA-X в диапазоне частот 8...12 ГГц (рис. 3).

Как следует из результатов эксперимента, частотная зависимость коэффициента прохождения сигнала из плеча 1 в плечо 3 циркулятора с ФК в схеме на отражение характеризуется наличием плоской разрешенной зоны, в диапазоне частот 8.7...10.4 ГГц (кривые 1 на рис. 3а и 3б), т.е. зоны с частотно-независимым коэффициентом прохождения, равным $|D|^2 \approx 1$.

Создание нарушения в виде изменения длины центрального слоя $L = 27$ мм ФК приводит к возникновению резонансной особенности – примесной моды затухания колебаний в разрешенной зоне ФК (см. рис. 3а кривая 2) на частоте $f_{1 \text{ эксп}} = 9.374$ ГГц, при этом вне резонансной особенности разрешенная зона расширяется (8.4...10.7 ГГц) и остается плоской с коэффициентом прохождения, близким к 1. При длине нарушенного слоя $L = 5$ мм резонансная особенность в запрещенной зоне (см. рис. 3б кривая 2) возникает на частоте $f_{1 \text{ эксп}} = 9.294$ ГГц, а разрешенная зона расширяется до значений 8.35...10.8 ГГц.

Таким образом, реализация фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением с нарушением периодичности в схеме на отражение с Y -циркулятором позволила создать фильтр заграждения на частоте $f_{1 \text{ эксп}} = 9.294$ ГГц с полосой заграждения ~ 123 МГц на уровне -3 дБ, уровнем запираения не хуже -40 дБ с коэффициентом прохождения вне полосы заграждения не менее $-0.2...-0.3$ дБ.

Отметим, что в отсутствие циркулятора полоса пропускания у фотонного кристалла получается существенно уже, чем полоса запираения. Таким образом, использование циркулятора решает проблему расширения полосы пропускания, так как наличие циркулятора преобразует отраженный от одного из плеч циркулятора сигнал в проходящий. Кроме того, характеристики выходного сигнала в полосе пропускания становятся плоскими,

что является свойством СВЧ ФК с циркулятором, и это можно отнести к достоинству предложенной схемы. С учетом вносимых циркулятором потерь результирующие потери на проход устройства в целом малы (не более 0.2...0.3 дБ). Достигнутые уникальные характеристики могут быть основанием для применения, например, в измерительных системах.

3. МОДЕЛЬ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА НА РЕЗОНАНСНЫХ ДИАФРАГМАХ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, УПРАВЛЯЕМЫМИ $n-i-p-i-n$ -ДИОДАМИ

Для создания устройств с электрически управляемым коэффициентом прохождения был использован СВЧ ФК, состоящей из семи резонансных диафрагм, в зазоре центральной диафрагмы была расположена структура на $n-i-p-i-n$ -диодах.

Резонансные волноводные диафрагмы являются часто применяемым элементом конструкции выключателей на $p-i-n$ -диодах. Малые геометрические размеры щели обеспечивают эффективное взаимодействие полупроводниковых элементов, имеющих малые габариты, с полем волновода. Поэтому создание фильтров заграждения с характеристиками, управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами на основе волноводных ФК с резонансными диафрагмами, обладающих высоким уровнем заграждения в полосе заграждения и минимальными потерями вне полосы, представляет научный и практический интерес.

Исследуемый ФК был создан в виде структуры, состоящей из семи периодически расположенных прямоугольных металлических резонансных диафрагм на расстоянии $L_0 = 20$ мм друг от друга в прямоугольном волноводе трехсантиметрового диапазона [40, 41]. Ширина щелей диафрагм ФК выбрана равной 20 мм, высота – 2 мм.

Для управления резонансными свойствами таких ФК использовали $n-i-p-i-n$ -диодную матрицу. Она состояла из четырех диодных элементов, которые были размещены в центральной диафрагме, выполненной в виде двух прямоугольных щелей (рис. 4). Размер каждой щели составлял 10.5×1.0 мм².

Для реализации СВЧ ФК на резонансных диафрагмах, характеризующегося наличием частотно-независимого коэффициента прохождения электромагнитного излучения в разрешенной зоне, была использована схема с Y -циркулятором (рис. 5).

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.

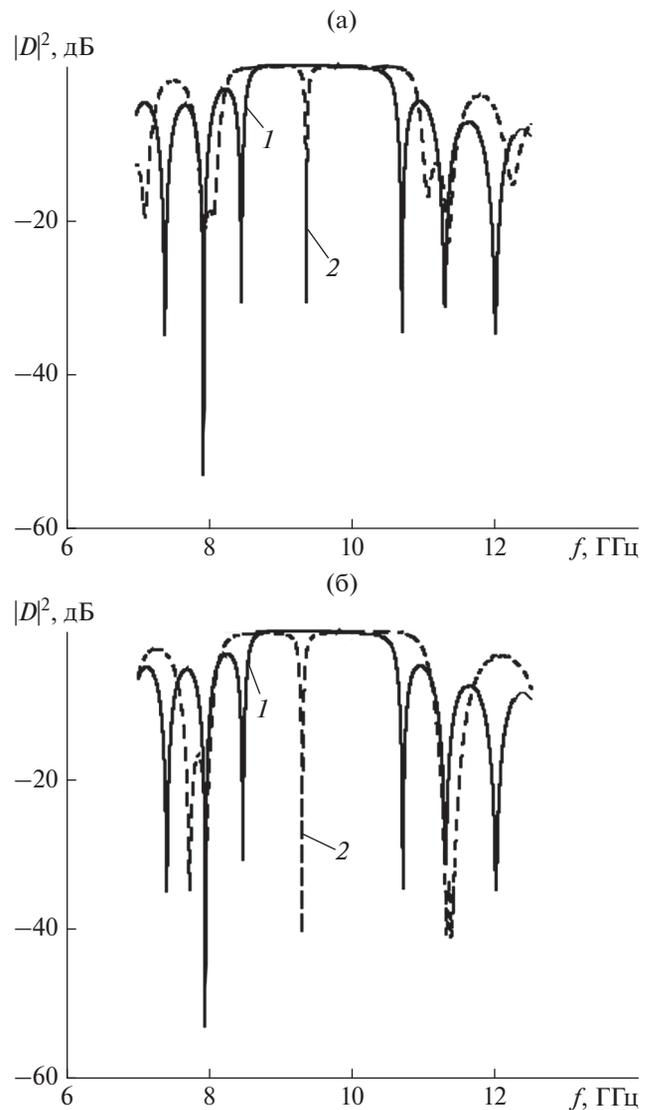


Рис. 3. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента прохождения $|D|^2$ сигнала из плеча 1 в плечо 3 циркулятора с фотонным кристаллом в схеме на отражение (см. рис. 2). 1 – фотонный кристалл без нарушений, 2 – фотонный кристалл с измененной длиной центрального слоя $L = 27$ (а) и 5 мм (б).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основе численного моделирования с использованием метода конечных элементов в программе ANSYS HFSS были исследованы АЧХ коэффициентов отражения и прохождения ФК в схеме с Y -циркулятором 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 электропровод-

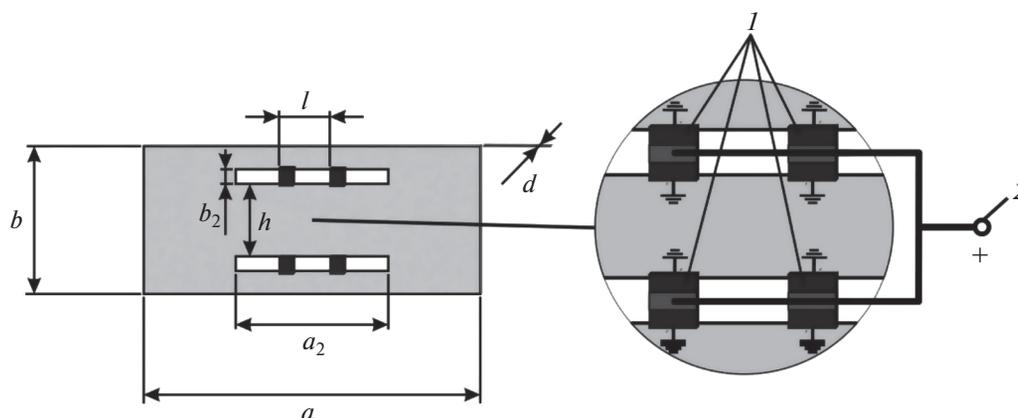


Рис. 4. Конструкция центральной диафрагмы ФК: 1 – $n-i-p-i-n$ -диодные структуры, 2 – источник постоянного напряжения; $a = 23$ мм, $b = 10$ мм, $d = 10$ мкм, $a_2 = 11.5$ мм, $b_2 = 1$ мм, $h = 5$ мм, $l = 3.8$ мм.

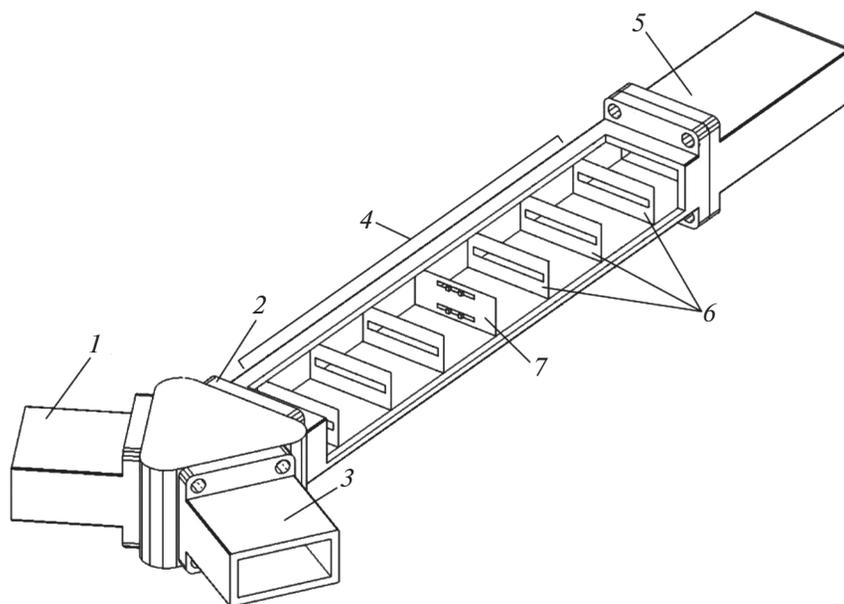


Рис. 5. Фотонный кристалл на резонансных диафрагмах в схеме на отражение с Y -циркулятором: 1 – вход Y -циркулятора, 2, 3 – выходы Y -циркулятора, 4 – фотонный кристалл, 5 – согласованная нагрузка, 6 – резонансные диафрагмы, 7 – центральная диафрагма ФК с $n-i-p-i-n$ -диодными структурами.

ности 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.

На рис. 6 представлены результаты расчета АЧХ коэффициента прохождения сигнала из плеча 1 Y -циркулятора в плечо 3 при подключении ФК с согласованной нагрузкой в плечо 2 ФК без нарушения периодичности и с введенной в ФК $n-i-p-i-n$ -матрицей в качестве нарушения центрального слоя с управляемыми характеристиками.

Как следует из результатов расчета, частотная зависимость коэффициента прохождения сигнала из плеча 1 в плечо 3 циркулятора с ФК в схеме на отражение с Y -циркулятором характеризуется наличием практически плоской разрешенной зоны в диапазоне частот 8.53...10.23 ГГц (см. рис. 6, кривая 1). Это обусловлено тем, что в схеме на отражение с Y -циркулятором, в отличие от рассмотренного в работе [41] ФК на резонансных диафрагмах, обладающего в этом диапазоне частот запрещенной зоной, в качестве передаточной характеристики используются отражательные способности ФК в диапазоне частот, соответствующем запрещенной зоне.

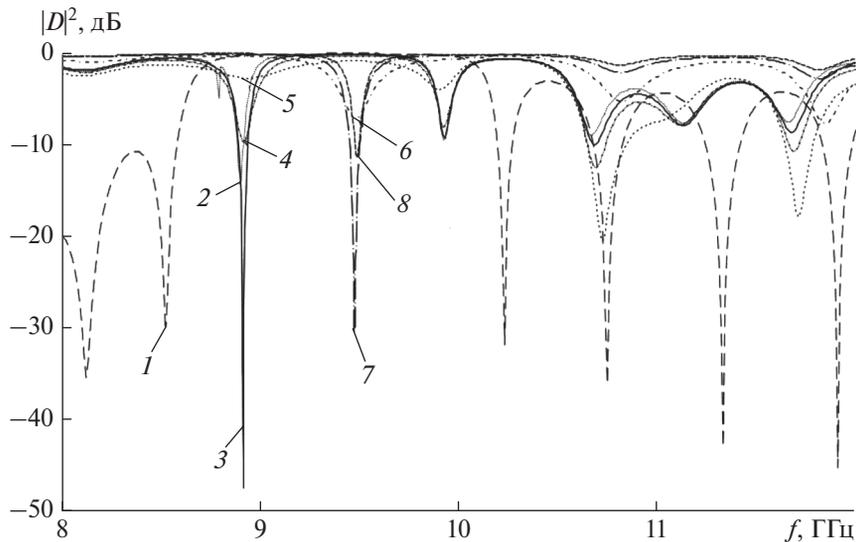


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента прохождения $|D|^2$ сигнала из плеча 1 в плечо 3 циркулятора с ФК в схеме на отражение (см. рис. 5): 1 — фотонный кристалл без нарушений из семи диафрагм без $n-i-p-i-n$ -матрицы, 2–8 — фотонный кристалл с управляющей $n-i-p-i-n$ -матрицей в качестве нарушения центрального слоя при различной удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры, $\sigma = 0$ (2), 0.4 (3), 2.0 (4), 10.0 (5), 100.0 (6), 1000.0 (7), 10000.0 См/м (8).

Следует отметить, что коэффициент передачи СВЧ ФК, структурными элементами которых могут выступать конструкции сложной формы и конфигурации, в том числе и резонансные диафрагмы [40, 41], может быть существенно меньше единицы даже на резонансных частотах, образующих разрешенную зону. Это происходит вследствие потерь электромагнитной энергии, связанных с возбуждением затухающих волн высших типов, например, на структурных элементах ФК в виде резонансных диафрагм и $n-i-p-i-n$ -структуры.

Введение $n-i-p-i-n$ -матрицы в ФК в качестве нарушения центрального слоя приводит к возникновению примесной моды затухания колебаний в разрешенной зоне ФК в схеме на отражение с Y -циркулятором на частоте $f_{1 \text{ теор}} = 8.91$ ГГц.

При изменении величины удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры от 0 до 0.4 См/м коэффициент прохождения $|D|^2$ уменьшается от -11.3 до -47.5 дБ, а в диапазоне $0.4 \dots 10^4$ См/м монотонно увеличивается от -47.5 дБ до -0.3 дБ. Это связано с тем, что $n-i-p-i-n$ -структура, являющаяся элементом нарушения фотонного кристалла, при удельной электропроводности i -слоя, равной 0, в отсутствие смещения может быть приближенно представлена в виде последовательной $R-C$ -цепочки (R — сопротивление потерь в сильнолегированных областях, омических контактах и выводах диода, C — емкость i -слоя). В этом режиме электромагнитное излучение с частотой $f_{1 \text{ теор}} = 8.91$ ГГц, поступающее на выход 2 Y -циркулятора, частично отражается от ФК и поступает

на выход 3. При увеличении удельной электропроводности i -слоя в диапазоне $0 \dots 0.4$ См/м $n-i-p-i-n$ -структура в основном поглощает электромагнитное излучение, что приводит к существенному уменьшению его отражения от ФК, и поэтому сигнал на выход 3 Y -циркулятора практически не поступает. Таким образом, реализуется режим возникновения примесной моды затухания колебаний в разрешенной зоне ФК в схеме с Y -циркулятором. При увеличении удельной электропроводности i -слоя от 0.4 до 10^4 См/м $n-i-p-i-n$ -структура практически полностью отражает электромагнитное излучение, что приводит к передаче сигнала на выход 3 Y -циркулятора с минимальным ослаблением, связанным с неидеальностью передаточных характеристик Y -циркулятора. Следует отметить, что использование в качестве передаточной характеристики СВЧ ФК на резонансных диафрагмах в схеме с Y -циркулятором отражательной способности ФК в диапазоне частот, соответствующем запрещенной зоне, позволяет избежать потерь электромагнитной энергии, связанных с возбуждением затухающих волн высших типов на структурных элементах ФК в виде резонансных диафрагм и $n-i-p-i-n$ -структуры.

Увеличение удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры до значений, больших 20 См/м, приводит к исчезновению примесной моды затухания колебаний на частоте $f_{1 \text{ теор}}$ и ее возникновению на частоте $f_{2 \text{ теор}} = 9.47$ ГГц, отличной от $f_{1 \text{ теор}}$. При этом на частоте $f_{2 \text{ теор}}$ с увели-

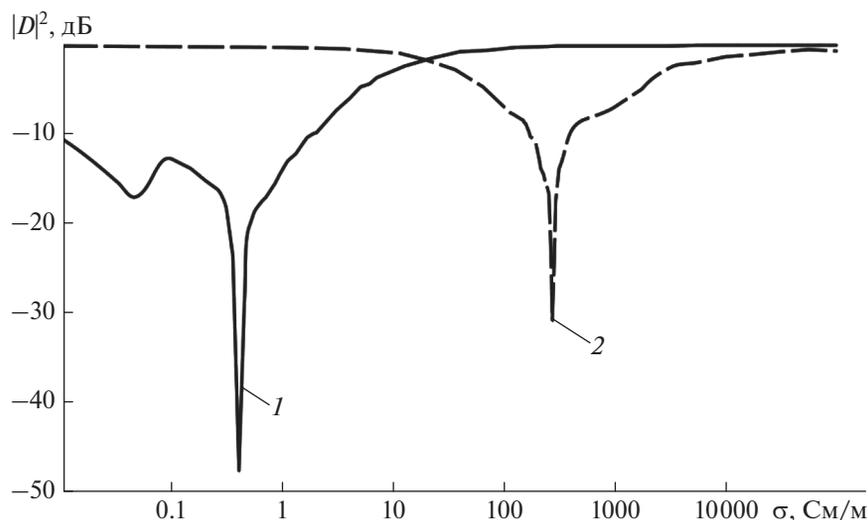


Рис. 7. Зависимости коэффициента прохождения от величины удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры на частотах примесных мод затухания колебаний ФК $f_{1\text{ теор}} = 8.91$ ГГц (кривая 1) и $f_{2\text{ теор}} = 9.47$ ГГц (2).

чением удельной электропроводности i -слоя в диапазоне $0...270$ См/м коэффициент прохождения уменьшается от -0.1 дБ до -30.66 дБ (см. рис. 6 кривая 3). Дальнейшее увеличение удельной электропроводности приводит к монотонному росту коэффициента прохождения на частоте $f_{2\text{ теор}}$.

Частотные зависимости коэффициента прохождения ФК в схеме с Y -циркулятором демонстрируют высокую чувствительность к величине удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры. При этом на частотах $f_{1\text{ теор}}$ и $f_{2\text{ теор}}$ наблюдаются немонотонные зависимости коэффициента прохождения от величины удельной электропроводности i -слоя в широком диапазоне ее изменения (рис. 7).

Исчезновение примесной моды затухания колебаний на частоте $f_{1\text{ теор}}$ в разрешенной зоне и ее возникновение на другой частоте $f_{2\text{ теор}}$ передаточной характеристики при увеличении до определенной величины удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры обусловлено эффектом изменения типа резонансного отражения электромагнитного излучения в слоистых структурах с проводящими слоями [41, 42] от полуволнового резонанса к четвертьволновому.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА НА РЕЗОНАНСНЫХ ДИАФРАГМАХ

Экспериментально исследовался ФК, созданный также в соответствии с описанной выше моделью, но состоящий из семи алюминиевых резонансных диафрагм толщиной 10 мкм. Расстояние между диафрагмами выбрано равным 20 мм и фиксировалось с помощью слоя пенопласта,

полностью заполняющего поперечное сечение прямоугольного волновода. В ФК в центральной диафрагме в качестве нарушения с управляемыми характеристиками была размещена $n-i-p-i-n$ -матрица из диодов типа 2A505 (см. рис. 4).

Передаточную характеристику $|D|^2$ исследуемых ФК измеряли в схеме с Y -циркулятором (см. рис. 5) с помощью векторного анализатора цепей Agilent Microwave Network Analyzer N5242A PNA-X в диапазоне частот $8...12$ ГГц.

Выбор размеров щелей диафрагм обеспечивал возникновение в диапазоне частот $8...12$ ГГц одной разрешенной и одной запрещенной зон на частотных зависимостях коэффициентов прохождения $|D|^2$. Результаты измерений представлены на рис. 8.

Как следует из результатов эксперимента, частотная зависимость коэффициента прохождения сигнала из плеча 1 в плечо 3 циркулятора с ФК в схеме на отражение характеризуется наличием плоской разрешенной зоны в диапазоне частот $8.5...9.85$ ГГц (см. рис. 8 кривая 1).

Введение в ФК $n-i-p-i-n$ -матрицы в качестве нарушения центрального слоя приводит к возникновению резонансной особенности — примесной моды затухания колебаний в разрешенной зоне ФК на частоте $f_{1\text{ эксп}} = 9.22$ ГГц. Изменение величины управляющего тока $n-i-p-i-n$ -структуры от 0 до 0.5 мкА приводит к уменьшению коэффициента прохождения на частоте примесной моды затухания колебаний $f_{1\text{ эксп}}$ от -29.7 дБ до -39.7 дБ. Дальнейшее увеличение управляющего тока от 0.5 мкА до 193.5 мА приводит к монотонному увеличению коэффициента прохождения на частоте $f_{1\text{ эксп}}$ от -39.7 до -0.8 дБ.

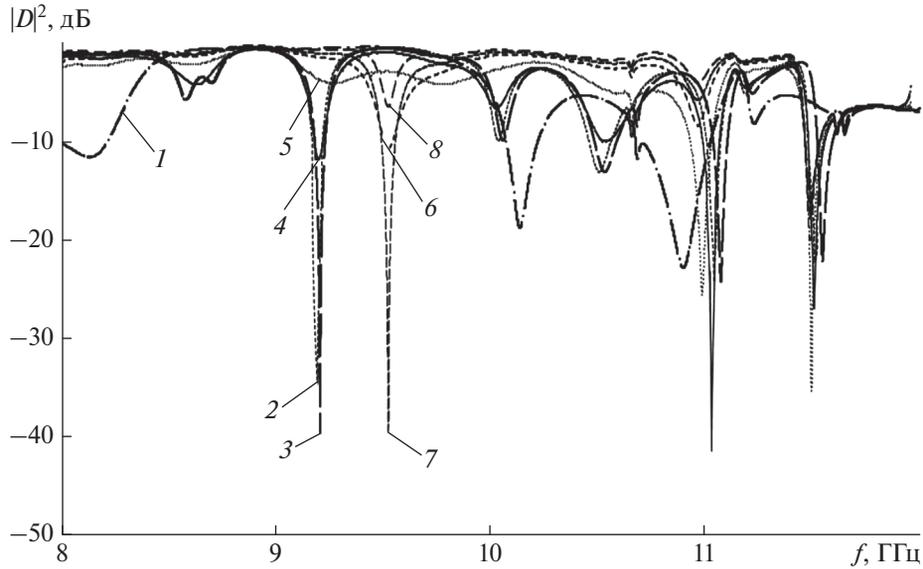


Рис. 8. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента прохождения $|D|^2$ сигнала из плеча 1 в плечо 3 циркулятора с ФК в схеме на отражение (см. рис. 5): 1 – фотонный кристалл без нарушений из семи диафрагм без $n-i-p-i-n$ -матрицы, 2–8 – фотонный кристалл с управляющей $n-i-p-i-n$ -матрицей в качестве нарушения центрального слоя при различных значениях управляющего тока, $I = 0.0$ (2), 0.0005 (3), 0.092 (4), 0.660 (5), 3.36 (6), 8.15 (7), 193.5 мА (8).

Такое поведение передаточной характеристики на частоте примесной моды связано с тем, что при малых токах инжекции 0...0.5 мкА $n-i-p-i-n$ -структура поглощает электромагнитное излучение, это приводит к существенному уменьшению его отражения от ФК и, следовательно, сигнал на выход 3 Y-циркулятора практически не поступает.

При увеличении тока инжекции до 193.5 мА $n-i-p-i-n$ -структура практически полностью отражает электромагнитное излучение, что приводит к передаче сигнала на выход 3 Y-циркулятора с минимальным ослаблением.

Увеличение тока, протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру, до значений, больших 0.66 мА, приводит к возникновению примесной моды затухания колебаний на частоте $f_{2 \text{ эксп}} = 9.56$ ГГц, отличной от $f_{1 \text{ эксп}}$. При этом на частоте $f_{2 \text{ эксп}}$ с увеличением протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру тока в диапазоне 0...8.15 мА коэффициент прохождения уменьшается от -0.82 до -43.27 дБ. Дальнейшее увеличение управляющего тока приводит к монотонному росту коэффициента прохождения на частоте $f_{2 \text{ эксп}}$ (см. рис. 8 кривая 8).

На рис. 9 представлены зависимости коэффициента прохождения $|D|^2$ сигнала из плеча 1 в плечо 3 Y-циркулятора с ФК в схеме на отражение на частотах примесных мод затухания колебаний ФК $f_{1 \text{ эксп}}$ и $f_{2 \text{ эксп}}$ от величины протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру тока. Такое поведение передаточной характеристики ФК в схеме с Y-циркулятором при увеличении протекающего через

$n-i-p-i-n$ -структуру тока хорошо согласуется с результатами численного моделирования.

Как и было предсказано в результате численного моделирования, частотные зависимости коэффициента прохождения ФК демонстрируют высокую чувствительность к величине протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру тока (см. рис. 9).

Таким образом, предложенная схема электрически управляемого фильтра заграждения, выполняющего роль модулятора и переключателя СВЧ-сигнала, на основе ФК на резонансных диафрагмах, реализованная с использованием Y-цир-

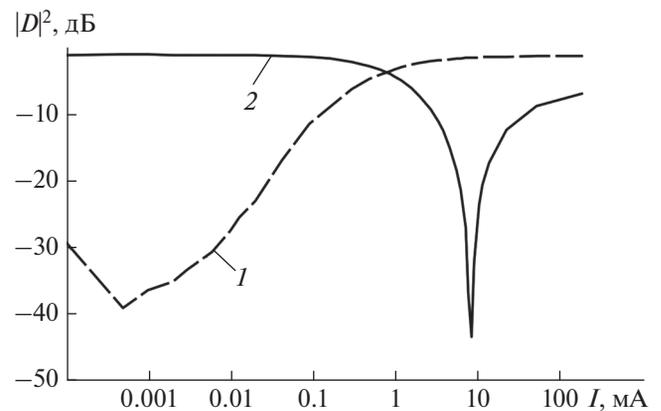


Рис. 9. Зависимости коэффициента прохождения от величины протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру тока на частотах примесных мод колебаний ФК $f_{1 \text{ эксп}} = 9.22$ ГГц (кривая 1) и $f_{2 \text{ эксп}} = 9.56$ ГГц (2).

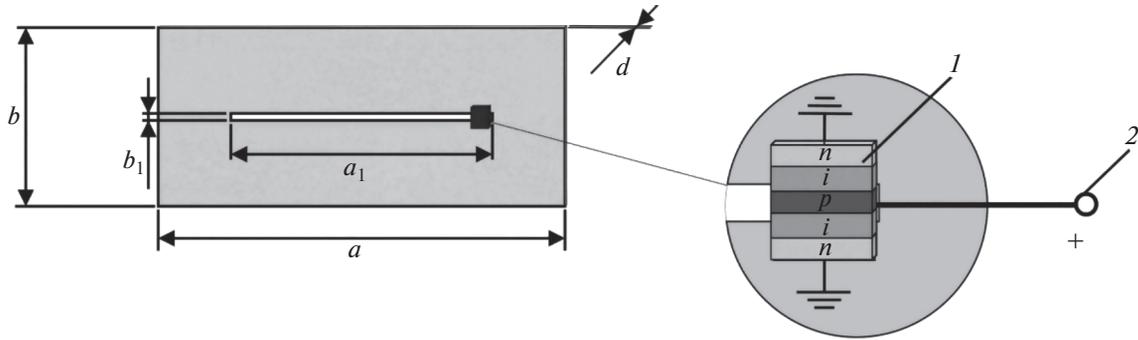


Рис. 10. Конструкция центральной диафрагмы фотонного кристалла с электрически управляемым размером щели: 1 – $n-i-p-i-n$ диодная структура, 2 – источник постоянного напряжения; $a = 23$ мм, $b = 10$ мм, $d = 10$ мкм, $a_1 = 15.3$ мм, $b_1 = 0.33$ мм.

кулятора. На частотах примесных мод затухания в прямом режиме обеспечены потери запирания -43.27 дБ и прямые потери на прохождение, равные -0.82 дБ. В инверсном режиме прямые потери составляют -0.82 дБ и потери запирания -39.7 дБ.

Для реализации в схеме с Y -циркулятором электрически управляемого фильтра загораживания с использованием ФК на резонансных диафрагмах с электрически управляемым размером щели диафрагмы, выполняющей роль нарушения, может быть использована конструкция, в которой вблизи одного из краев центральной диафрагмы со щелью уменьшенной ширины расположена $n-i-p-i-n$ -структура [41] (рис. 10).

При больших прямых токах структура на $n-i-p-i-n$ -диодах выполняет роль проводящего вклю-

чения, уменьшающего ширину щели диафрагмы и смещающего положение примесной моды затухания колебаний в сторону высокочастотного края запрещенной зоны.

На рис. 11 представлены АЧХ коэффициентов прохождения $|D|^2$ сигнала из плеча 1 в плечо 3 Y -циркулятора с ФК с электрически управляемым размером щели диафрагмы, выполняющей роль нарушения. Как следует из результатов эксперимента, в разрешенной зоне передаточной характеристики СВЧ ФК возникает примесная мода затухания колебаний на частоте $f_{1\text{эксп}} = 9.03$ ГГц, которая смещается по частоте на величину, равную 160 МГц, в сторону высокочастотного края запрещенной зоны при пропускании через $n-i-p-i-n$ -диодную структуру прямого тока, равного 550 мА. При этом на частоте примесной моды колебаний 9.03 ГГц наблюдается увеличение коэффициента прохождения от -20.35 дБ при $I = 0$ мА до -1.65 дБ при $I = 550$ мА.

Компьютерное моделирование передаточной характеристики СВЧ ФК с электрически управляемым размером щели центральной диафрагмы показало возможность значительного уменьшения прямых потерь, если удельная электропроводность i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры достигнет величины 10^5 См/м. Это может произойти при использовании $n-i-p-i-n$ -структур с гетеропереходами, обеспечивающими более высокий уровень инжекции по сравнению с традиционными гомопереходами. Отметим, что управление размерами щелей диафрагм для достижения описанного выше эффекта смещения примесной моды затухания колебаний также возможно с использованием MEMS-ключей.

Примером применения фильтров с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками, обладающих уровнем запирания на резонансной частоте более 43 дБ и потерями вне ее менее 0.8 дБ, может служить, например, фильтр для подавле-

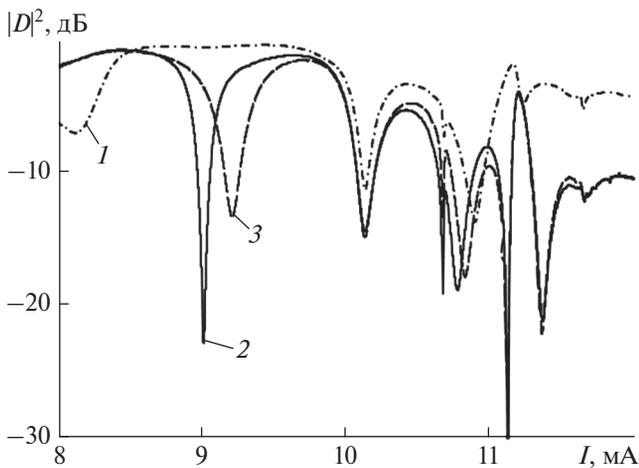


Рис. 11. Экспериментальные АЧХ коэффициента прохождения $|D|^2$ сигнала из плеча 1 в плечо 3 циркулятора (см. рис. 5) с ФК без нарушения (1) и с электрически управляемым размером щели диафрагмы при отсутствии протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру прямого тока и при его наличии, $I = 0.0$ (2), 550 мА (3).

ния субгармоник и более высоких гармоник в СВЧ-умножителях частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование отражательных свойств ФК с диэлектрическим заполнением и резонансными диафрагмами позволило в схеме с Y -циркулятором реализовать систему, обладающую разрешенной зоной с частотно-независимой передаточной характеристикой, близкой к единице.

С использованием программы ANSYS HFSS трехмерного моделирования электромагнитных полей методом конечных элементов выполнен расчет передаточных характеристик СВЧ ФК с диэлектрическим заполнением и резонансными диафрагмами с нарушением периодичности в виде $n-i-p-i-n$ -диодной матрицы в схеме с Y -циркулятором.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено существование примесных мод затухания колебаний в разрешенной зоне фотонного кристалла с частотно-независимой передаточной характеристикой в схеме с Y -циркулятором при изменении тока в $n-i-p-i-n$ -диодной матрице, выполняющей роль нарушения в виде проводящего слоя в фотонном кристалле на резонансных диафрагмах.

Предложена и исследована система в виде ФК с плоской разрешенной зоной на резонансных диафрагмах с электрически управляемым размером центральной диафрагмы с помощью $n-i-p-i-n$ -диодной структурой в схеме с Y -циркулятором.

Показана возможность использования отражательных свойств ФК с диэлектрическим заполнением и резонансными диафрагмами в схеме с Y -циркулятором для создания фильтров заграждения с характеристиками, управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами. Фильтры заграждения обладают уровнем запираения в полосе заграждения более 43 дБ и потерями вне полосы менее 0,8 дБ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (гос. задание № 8.7628.2017/БЧ) и стипендии Президента Российской Федерации (СП-3301.2018.3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения. М.: Физматлит, 2018.
2. Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopoulos N.G. // IEEE Trans. 2001. V. MTT-49. № 2. P. 297.
3. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. // Progress in Electromagnetics Research. 2003. V. 41. P. 185.
4. Gomez A., Vegas A., Solano M.A., Lakhtakia A. // Electromagnetics. 2005. V. 25. № 5. P. 437.
5. Burns G.W., Thayne I.G., Arnold J.M. // Proc. Europ. Conf. on Wireless Technology, Amsterdam. 11–12 Oct. 2004. N.Y.: IEEE, 2004. P. 229.
6. Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф. // ДАН. 2005. Т. 400. № 2. С. 181.
7. Усанов Д.А., Мецанов В.П., Скрипаль А.В. и др. // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 2. С. 216–220.
8. Fernandes H.C.C., Medeiros J.L.G., Junior I.M.A. et al. // PERS Online. 2007. V. 3. № 5. P. 689.
9. Saib A., Huynen I. // Electromagnetics. 2006. V. 26. № 3–4. P. 261.
10. Bage A., Das S. // J. Circuits, Systems and Computers. 2017. V. 26. № 6. P. 1750096-1.
11. Teberio F., Soto P., Arregui I. et al. // Proc. Int. Microwave Symp. Honolulu, USA, 4–9 June, 2017. N.Y.: IEEE, 2017. P. 1464.
12. Torielli di Crestvolant V., De Paolis F. // IEEE Trans. 2018. V. MTT-66. № 2. P. 954.
13. Kirilenko A., Rud L., Tkachenko V., Kulik D. // IEEE Trans. 2018. V. MTT-50. № 5. P. 1324.
14. Bage A., Das S.A. // J. Circuits, Systems and Computers. 2018. V. 27. № 7. P. 1850100-1.
15. Mondal P., Sahoo M. Parui S.K. // Microwave and Optical Technol. Lett. 2016. V. 58. № 3. P. 593.
16. Chan K.Y., Ramer R., Mansour R.R. // Microwave and Wireless Components Lett. 2017. V. 27. № 1. P. 34.
17. Stefanovski S.Lj., Potrebic M.M., Tošić D.V. // Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications. 2015. V. 9. № 1–2. P. 87.
18. Stefanovski S.Lj., Potrebic M.M., Tošić D.V., Cvetković Z. // Proc. of 29th Int. Conf. on Microelectronics. Belgrade. 12–14 May, 2014. N.Y.: IEEE, 2014. P. 435.
19. Mrvić M.V., Potrebic M.M., Tošić D.V. // J. Computational Electronics. 2017. V. 16. № 3. P. 939.
20. Sorkherizi M.S., Kishk A.A. // Proc. 17th Int. Symp. on Antenna Technology and Applied Electromagnetics. Montréal, 24–28 Oct. 2016. N.Y.: IEEE, 2016. P. 1.
21. Motakabber S.M.A. Suharsono M.S. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Kuala Lumpur, Malaysia, 8–9 Aug. 2017. V. 260. P. 012016. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/260/1/012016/pdf>.
22. Weng L.H., Guo Y.C., Shi X.W., Chen X.Q. // Progress in Electromagnetics Research B. 2008. V. 7. P. 173.
23. Lee S., Oh S., Yoon W.S., Lee J. // Microwave and Optical Technol. Lett. 2016. V. 58. № 6. P. 1265.
24. Yang Y., Zhang Y.H., Fan Y., Li Y.X. // Int. J. Microwave and Wireless Technol. 2015. V. 7. № 2. P. 135.
25. Chan K.Y., Ramer R., Mansour R.R., Sorrentino R. // IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2016. V. 26. № 10. P. 798.
26. Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Stewart W.J. // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 11. P. 2075.
27. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В. и др. // Изв. вузов. Электроника. 2010. № 1. С. 24.
28. Хелин Е.А. // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 8. С. 140.
29. Yokoi N., Fujisawa T., Saitoh K., Koshiba M. // Optics Express. 2006. V. 14. № 10. P. 4459.
30. Schneider G.J., Hanna S., Davis J.L., Watson G.H. // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. № 6. P. 2642.

31. *Wei T., Wu S., Huang J. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. № 11. P. 113517-1.
32. *Морозов Г.А., Морозов О.Г., Насыбулин А.Р. и др.* // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 3. С. 65.
33. *Мухортов В.М., Масычев С.И., Маматов А.А., Мухортов Вас.М.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 20. С. 70.
34. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В. и др.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 8. С. 143.
35. *Никитин Ал.А., Никитин Ан.А., Устинов А.Б. и др.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 6. С. 115.
36. *Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Рязанов Д.С.* // РЭ. 2016. Т. 61. № 4. С. 321.
37. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 5. С. 112.
38. *Usanov D.A., Skripal A.V., Abramov A.V. et al.* // Proc. of 36rd Europ. Microwave Conf. Manchester. 10–15 Sept. 2006. N.Y.: IEEE, 2014. P. 921.
39. *Усанов Д.А., Мещанов В.П., Скрипаль А.В. et al.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 2. P. 216.
40. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г.* // Радиотехника. 2015. № 10. С. 108.
41. *Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В. и др.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 1. С. 65.
42. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 2. С. 13.