



УДК 621.372.2

СВЧ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ. НОВЫЕ СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Д. А. Усанов¹, М. К. Мерданов², А. В. Скрипаль¹, Д. В. Пономарев¹

¹Саратовский государственный университет

²ОАО «НПЦ «Электронное приборостроение»

E-mail: usanovda@info.sgu.ru



Приведены результаты теоретического и экспериментального обоснования возможности применения СВЧ фотонных кристаллов для создания широкополосных согласованных СВЧ-нагрузок. Показана возможность использования СВЧ фотонных кристаллов для измерения толщины и проводимости нанометровых полупроводниковых слоистых структур. Экспериментально продемонстрирована возможность электрического управления амплитудно-частотными характеристиками СВЧ фотонных кристаллов. Определены пути уменьшения размеров устройств на фотонных кристаллах.

Ключевые слова: СВЧ фотонный кристалл, согласованные нагрузки, измерения толщины и электропроводности, нанометровые полупроводниковые структуры, управление амплитудно-частотными характеристиками, резонатор СВЧ-микроскопа.

Microwave Photonic Crystals. New Application Areas

D. A. Usanov, M. K. Merdanov,
A. V. Skripal, D. V. Ponomarev

The theoretical and experimental justifications of the possibility to use the microwave photonic crystals for the creation of broadband loads have been presented. The possibility to simultaneously determine the thickness and the conductivity of nanometer semiconductor layered structures by use of the microwave photonic crystals has been shown. The possibility of electrical control of the microwave photonic crystals amplitude-frequency characteristic has been experimentally demonstrated. The means to reduce the sizes of the devices based on the microwaves photonic crystals have been determined.

Key words: microwave photonic crystal, loads, measurements of thickness and conductivity, nanometer semiconductor structures, amplitude-frequency characteristic controlling, microwave microscope's resonator.

В одной из пионерских работ по фотонным кристаллам [1] авторы называют их метаматериалами, имеющими периодически изменяющуюся в пространстве диэлектрическую проницаемость. С этой периодичностью связано наличие так называемой запрещенной для распространения электромагнитных волн зоны в спектре частот. Отметим, что авторы [1] имели в виду применение такого вида структур для направления и формирования потоков света. Авторы [2] отмечали существование аналогии между электронными волнами в кристалле и волнами света в периодической структуре. Это открыло возможность при-

менения понятий зонной теории твердого тела к оптическим волнам. Запрещенные зоны могут чередоваться с разрешенными. Запрещенные и разрешенные зоны в периодических диэлектрических структурах можно считать своего рода аналогами запрещенных и разрешенных зон в полупроводниках. Дефект фотонного кристалла в виде нарушения периодичности так же, как и в полупроводниках, может приводить к появлению в зонах локализованных состояний [1]. Авторы [1] утверждали, что точечный дефект может действовать как микрорезонатор, линейный – как волновод, плоский – как зеркало.

Отметим, что аналогия свойств периодических структур в СВЧ-диапазоне со свойствами спектров кристаллов при рассмотрении их энергетических зон отмечалась еще в начале 1960-х гг. разработчиками замедляющих систем для вакуумных СВЧ-приборов [3]. Авторы [3, с. 15] называли замедляющие системы «как бы искусственными кристаллами, ячейки которых имеют большие размеры». Спецификой решаемых задач определялся выбор элементов замедляющих систем из металлов. Примерами таких периодических систем являются «меандр», «встречные штыри», системы с чередующимися диафрагмами и др.

В [1] отмечается возможность очень точного теоретического описания характеристик электромагнитной волны, направленной на фотонный кристалл. Такая возможность подробно описывалась, например, в [4].

Известны примеры создания фотонных кристаллов в оптическом, инфракрасном, ультрафиолетовом, СВЧ-диапазоне. Для СВЧ-диапазона создать фотонный кристалл наиболее просто.

Возможности практического применения СВЧ фотонных кристаллов рассматривались в [5–9]. В качестве примеров приводятся высоконаправленные резонансные антенны, резонансные полости для размещения полупроводниковых детекторов, различные типы СВЧ-фильтров, в том числе с управляемыми характеристиками.



В настоящей работе рассмотрены возможности новых практических применений свойств СВЧ фотонных кристаллов.

Известны широко применяемые в технике СВЧ-устройства, называемые СВЧ-нагрузками. Проблема конструирования широкополосных согласованных нагрузок, несмотря на продолжительную историю их существования, и сегодня остается одной из актуальных задач СВЧ-радиоэлектроники. СВЧ-нагрузки широко применяются как самостоятельно, так и в составе сложных функциональных устройств направленных ответвителей, сумматоров, измерителей мощности, измерительных мостов, фильтров и т. д. [10, 11]. Одной из основных задач, которую необходимо решить при создании согласованных нагрузок, предназначенных для работы на малых и средних уровнях мощности СВЧ-излучения, является обеспечение согласования в максимально широком диапазоне частот при минимальных габаритах конструкции. Для решения такой задачи, как показано в [12], можно использовать свойства СВЧ фотонных кристаллов. В [13, 14] для обеспечения согласования было предложено использовать частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона от фотонных кристаллов, со-

держащих нанометровые металлические слои. Показано, что коэффициент отражения в таких системах может изменяться в очень широких пределах при незначительных вариациях толщины металлической пленки, не превышающей нескольких десятков нанометров.

В качестве СВЧ-нагрузки в [12, 13] предложено использовать фотонный кристалл, выполненный в виде короткозамкнутого с одной стороны отрезка волновода с размещенным внутри него СВЧ фотонным кристаллом, представляющим собой полностью заполняющую по поперечному сечению волновода структуру из чередующихся нанометровых металлических слоев с различными значениями толщины и диэлектрической проницаемости. Плоскости слоев были ориентированы перпендикулярно направлению распространения электромагнитной волны.

Для расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны при ее падении на слоистую металлodieлектрическую структуру, состоящую из N слоев, использовалась матрица передачи волны между областями с различными значениями постоянных распространения волны, подобно тому, как это было сделано в [14–16]:

$$T(Z_{j,j+1}) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp((\gamma_{j+1} - \gamma_j)Z_{j,j+1}) \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp((\gamma_{j+1} + \gamma_j)Z_{j,j+1}) \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp(-(\gamma_{j+1} + \gamma_j)Z_{j,j+1}) \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp(-(\gamma_{j+1} - \gamma_j)Z_{j,j+1}) \end{array} \right\},$$

которая связывает амплитуды падающих A_j, A_{j+1} и отраженных B_j, B_{j+1} волн по обе стороны от границы $Z_{j,j+1}$ соотношением

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = T(Z_{j,j+1}) \cdot \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix}.$$

Коэффициенты A_{N+1} и B_0 , определяющие амплитуды волны, прошедшей через многослойную структуру (рис. 1) [13], и волны, отраженной от нее, связаны с коэффициентом A_0 , определяю-

щим амплитуду падающей волны, соотношением

$$\begin{pmatrix} A_{N+1} \\ 0 \end{pmatrix} = T_N \cdot \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix},$$

где

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

– матрица передачи слоистой структуры, состоящей из N слоев (см. рис. 1).

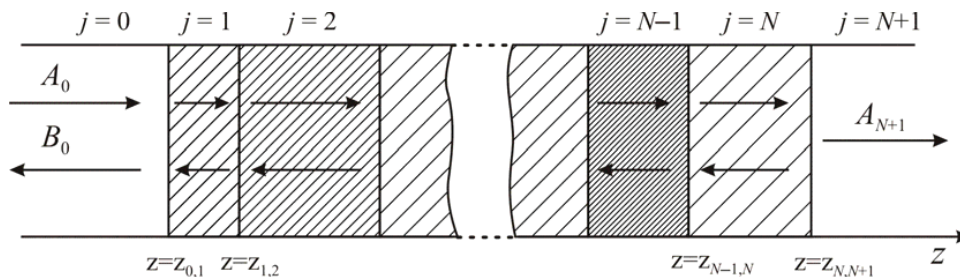


Рис. 1. Слоистая структура, состоящая из N слоев



Коэффициенты отражения $R=B_0/A_0$ и прохождения $D=A_{N+1}/A_0$ электромагнитной волны, взаимодействующей со слоистой структурой, определяются следующими соотношениями:

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

Количество слоев, их толщины, диэлектрические проницаемости, электропроводности и порядок чередования слоев определялись в результате решения задачи по оптимизации таким образом, чтобы в заданном частотном диапазоне величины коэффициентов отражения и прохождения были меньше заданных значений. Оптимизация проводилась численно с использованием итерационного метода Левенберга – Марквардта.

Результаты расчетов $|R|^2$ (сплошная кривая) и $|D|^2$ (штриховая кривая) в диапазоне 8–12 ГГц при использовании СВЧ фотонного кристалла из 6 чередующихся слоев нанометровой металлической пленки, нанесенных на керамическую подложку (Al_2O_3), представлены на рис. 2 [12, 13].

Аналогичные зависимости для диапазона 30–37 ГГц при использовании СВЧ фотонных кристаллов представлены на рис. 3.

Из результатов, приведенных на рис. 2, следует, что $|R|^2$ менее –23 дБ получается в диапазоне 8.4 ÷ 11.2 ГГц, $|D|^2$ менее –25 дБ в диапазоне 8 ÷ 12 ГГц, $K_{сгУ} \leq 1.05$ – в диапазоне 8.4 ÷ 11.2 ГГц.

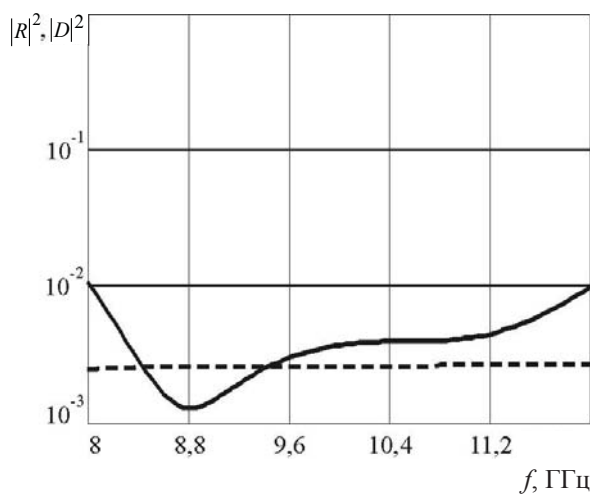


Рис. 2. Частотные зависимости $|R|^2$ (—) и $|D|^2$ (- - -) для согласованной нагрузки в трехсантиметровом диапазоне длин волн

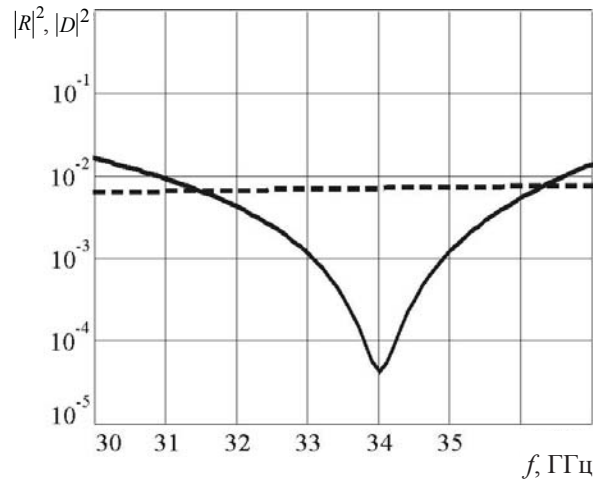


Рис. 3. Частотные зависимости $|R|^2$ (—) и $|D|^2$ (- - -) для согласованной нагрузки в восьмимиллиметровом диапазоне длин волн

В эксперименте использовались чередующиеся слои из поликора ($\epsilon = 9.6$) и фторопласта ($\epsilon = 2.1$) и нанослой металла (хром). Измерения проводились с помощью панорамного измерителя КСВН и ослабления Р2-61. Соответствующие экспериментальные зависимости приведены на рис. 4 [12, 13].

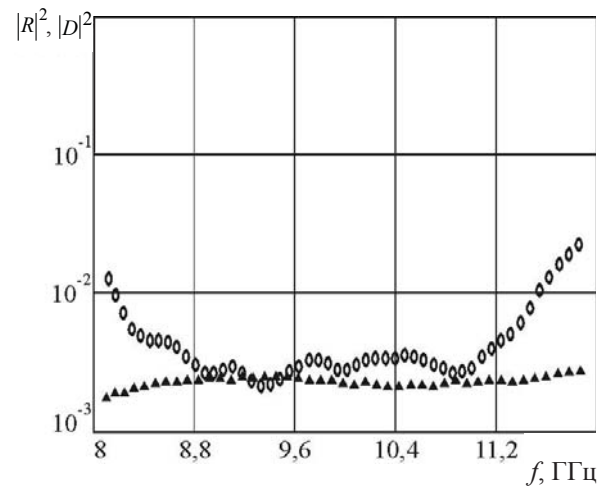


Рис. 4. Экспериментальные частотные зависимости $|R|^2$ (○○○○) и $|D|^2$ (▲▲▲▲) для согласованной нагрузки в трехсантиметровом диапазоне длин волн

Экспериментальные зависимости R и D от частоты в диапазоне 26–40 ГГц для 9-слойной структуры, состоящей из чередующихся слоев: фторопласт, поликор, нанометровый слой тантала, приведены на рис.5. Из экспериментальных



результатов следует, что значения $R < 3.5\%$ и $D < 1.8\%$ обеспечиваются при использовании этой структуры.

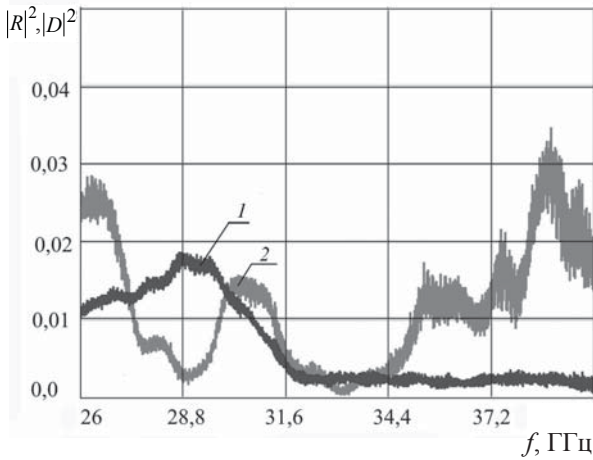


Рис. 5. Экспериментальные зависимости коэффициентов прохождения D (кривая 1) и отражения R (кривая 2) от частоты в диапазоне 26–40 ГГц

Измеренная зависимость $|R|^2$ от f при нанесении пленки хрома на поликоровую подложку и размещении фотонного кристалла перед измеряемой структурой (рис. 6) и после неё (рис. 7) приведена в [17].

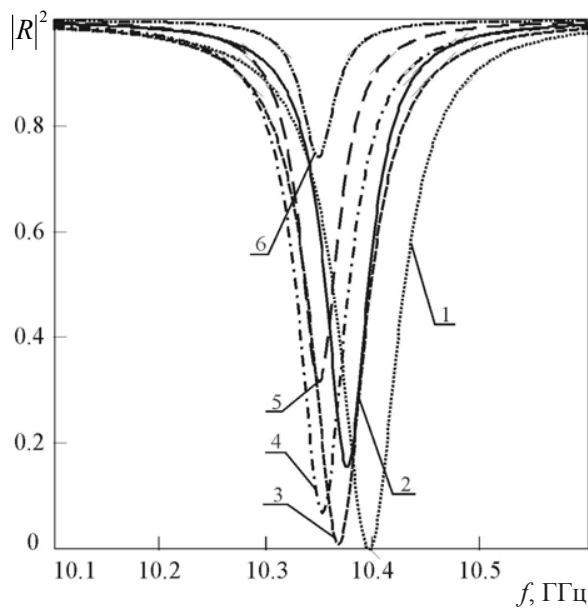


Рис. 6. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла для различных значений толщины нанометрового металлического слоя h при размещении фотонного кристалла перед измеряемой структурой ($d_0 = 4$ мм): 2 – 0; 3 – 4; 4 – 20; 5 – 50; 6 – 200 (кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без измеряемой структуры)

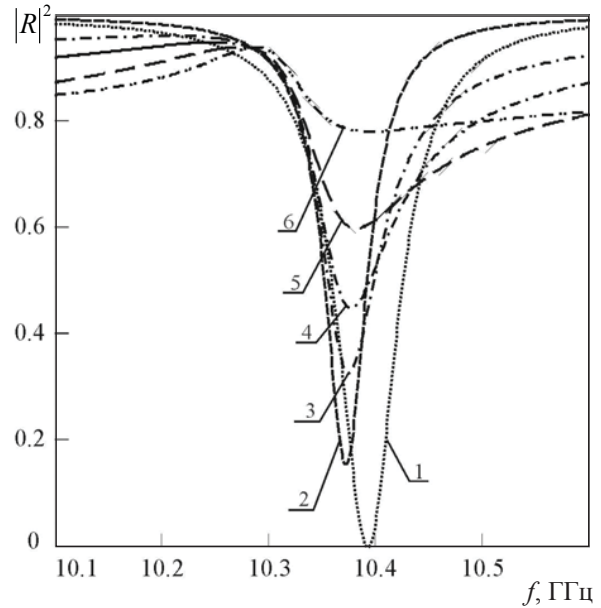


Рис. 7. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла для различных значений толщины нанометрового металлического слоя h при размещении измеряемой структуры перед фотонным кристаллом при толщине нарушенного шестого слоя $d_0 = 4$ мм (пенопласт): 2 – 0; 3 – 2,5; 4 – 5; 5 – 10; 6 – 25 (кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без измеряемой структуры)

В [18] приведены частотные характеристики фотонного кристалла, реализованного в виде последовательности отрезков микрополосковой линии с периодически изменяющейся шириной верхнего полоска (рис. 8).

В качестве отдельного элемента фотонного кристалла в рассматриваемом случае выступают соединенные отрезки микрополосковых линий с различной шириной верхнего полоска. При моделировании рассматривалась структура из семи чередующихся отрезков микрополосковой линии, включенная в 50-омную линию передачи. Ширина полосков равнялась 2.5 и 0.5 мм. Длина широких отрезков 7 мм, узких – 7.6 мм. Диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon = 9.6$. На рис. 9 [18] приведены результаты расчета зависимости квадрата модуля коэффициента пропускания $|D|^2$ для рассматриваемой структуры для различных значений длины нарушенного четвертого отрезка с меньшей, чем у остальных, шириной.

Кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без нарушений, кривые 2–4 – различным значениям l . Видно, что наличие нарушений вызывает появление «окна» прозрачности.

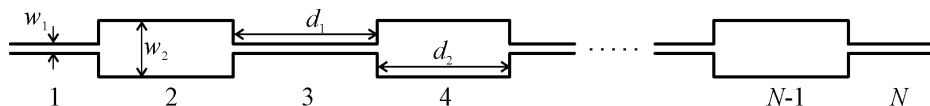


Рис. 8. Структура микрополоскового фотонного кристалла

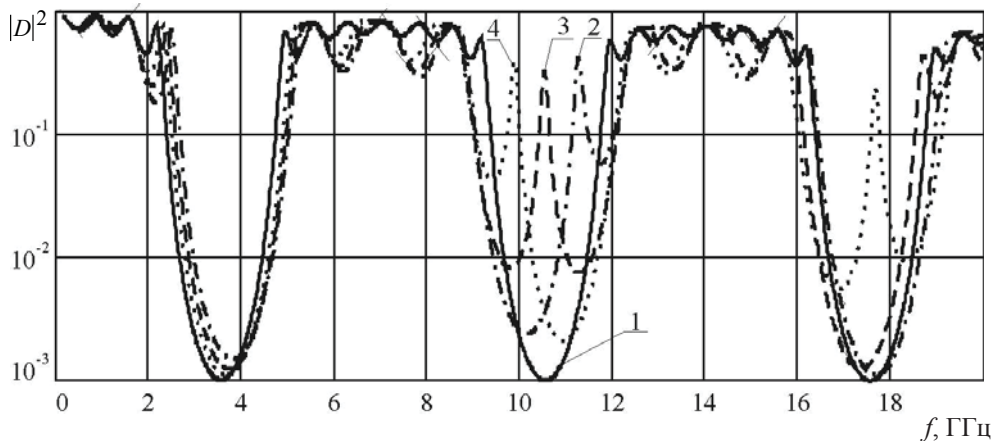


Рис. 9. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента пропускания микрополоскового фотонного кристалла для различных значений длины l_4 нарушенного 4-го отрезка (отрезок с меньшей шириной): кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без нарушений, кривая 2 – $l_4 = 4.2$ мм, 3 – $l_4 = 5.1$ мм, 4 – $l_4 = 6.0$ мм

При $l = 5.1$ см центральная частота окна прозрачности составляла 10.5 ГГц. На рис. 10 приведены экспериментальные зависимости $|D|^2$ для $l_4 = 5.1$ и различных значений ϵ образцов, размещенных над четвертым слоем.

Эти зависимости демонстрируют высокую чувствительность вида частотной зависимости $|D|^2$ от ϵ образцов. Известно, что при наличии нарушений в периодичности слоистой структуры в запрещенной зоне фотонного кристалла

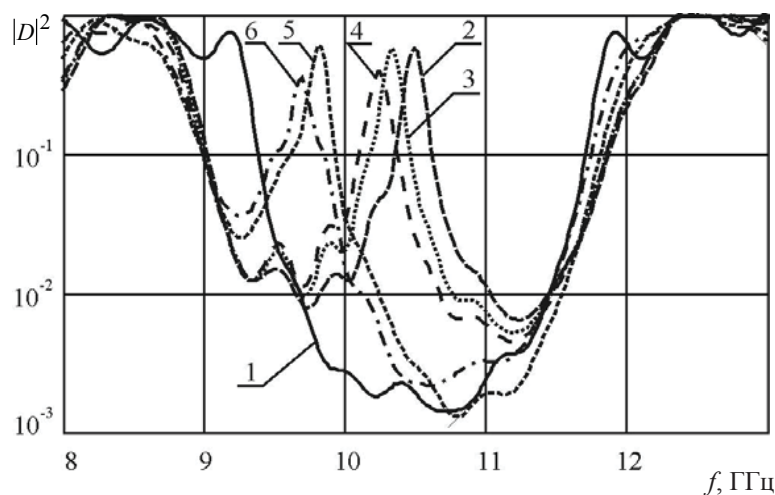


Рис. 10. Экспериментальные зависимости $|D(f)|^2$ фотонного кристалла при наличии нарушения его периодичности в виде изменения длины четвертого слоя $l_4 = 5.1$ мм для различных значений ϵ образцов, размещаемых над четвертым высокоомным отрезком микрополосковой линии: 3 – $\epsilon = 2.1$, 4 – $\epsilon = 2.5$, 5 – $\epsilon = 9.6$, 6 – $\epsilon = 11.8$. Кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без нарушений, кривая 2 – фотонному кристаллу с нарушением при отсутствии измеряемого образца



могут возникать узкие «окна» прозрачности [19]. Известна также высокая чувствительность частотной зависимости «окон» прозрачности в запрещенной зоне фотонного кристалла к изменению характеристик нарушения периодичности. Авторами [20] была показана возможность использования этого свойства СВЧ фотонных кристаллов для измерения диэлектрической проницаемости слоистых диэлектриков. Для измерения параметров диэлектриков на СВЧ существует множество других методов. Гораздо менее разработаны СВЧ-методы измерения металлодиэлектрических и металлополупроводниковых структур, в особенности в области нанометровых толщин металлических покрытий.

Возможность использования волновых и микрополосковых фотонных структур для измерения параметров металлических слоев на изолирующих подложках была показана в [21, 22]. Это стало возможным благодаря тому, что частотные характеристики волны, распространяющейся в волноводной или микрополосковой структуре с СВЧ фотонным кристаллом, полученные расчетным путем и в результате измерений, могут находиться в хорошем соответствии, как это отмечалось авторами [1]. В [17] приведены результаты расчета зависимости $|R|^2$ от 11-слойной структуры фотонного кристалла в 3-сантиметровом диапазоне длин волн при распространении волны типа H_{10} (рис. 11, кривая 1).

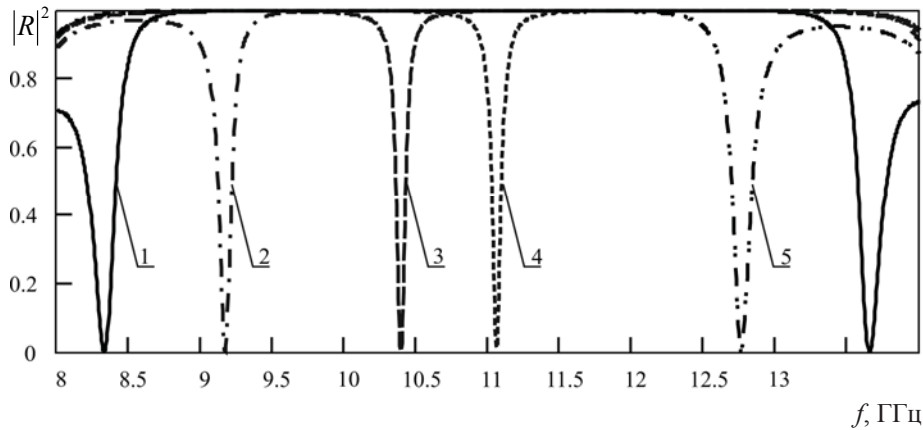


Рис. 11. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла для различных значений толщины нарушенного шестого слоя d_6 , мм (слой пенопласта): 2 – 7.0; 3 – 4.0; 4 – 3.0; 5 – 1.0 (кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без нарушений)

На этом же рисунке приведены результаты расчетов аналогичной зависимости при наличии в структуре нарушения периодичности в виде одного «шестого» слоя меньшей толщины d_6 (рис. 11, кривые 2–5). Как следует из результатов, приведенных на этом рисунке, наличие нарушений периодичности приводит к появлению «донорных» (кривая 5) или «акцепторных» (кривая 2) окон прозрачности в запрещенной зоне.

Величина $|R|^2$ и его местоположение зависят от диэлектрической проницаемости одного из слоев (рис. 12) и толщины нарушенного слоя.

Частотные зависимости $|R|^2$ вблизи окна прозрачности для различных значений толщины нанометрового металлического слоя h приведены на рис. 6.

Использование теоретической и экспериментальной зависимостей $|R(\omega)|^2$ позволяет определить толщину $t_{\text{м.иск}}$ нанометровой металлической пленки при известной ее электропроводности [23]. Для этого может быть использован метод наименьших квадратов, при котором $t_{\text{м.иск}}$ аналогично тому, как это было сделано в [24, 25], находится из условия минимума суммы:

$$S = \sum (|R_{\text{эксп}}|^2 - |R(\omega, t_{\text{м.иск}})|^2)^2.$$

Толщина $t_{\text{м.иск}}$ определяется в результате решения численным методом уравнения

$$\frac{\partial S(t_{\text{м.иск}})}{\partial t_{\text{м.иск}}} = \frac{\partial (\sum (|R_{\text{эксп}}|^2 - |R(\omega, t_{\text{м.иск}})|^2)^2)}{\partial t_{\text{м.иск}}} = 0.$$

Из результатов расчета, приведенных на рис. 13, следует, что $|R(\omega)|^2$ существенным обра-

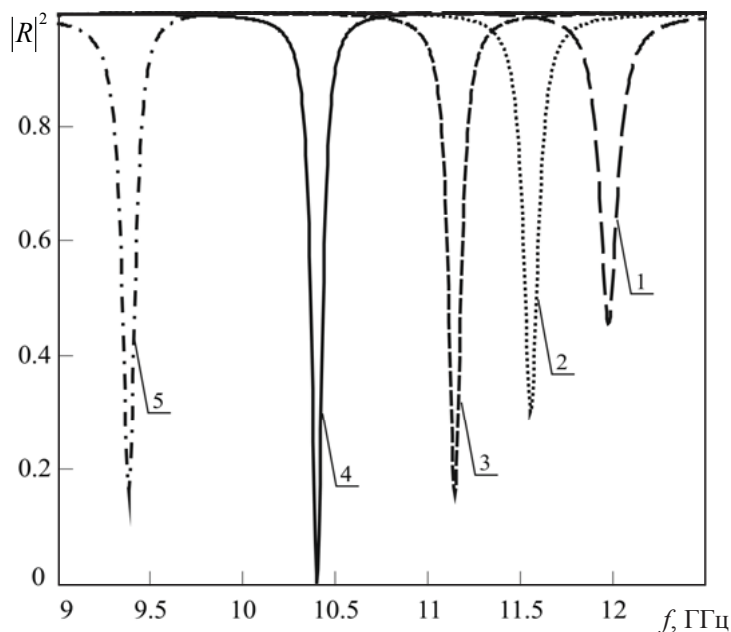


Рис. 12. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла для различных значений диэлектрической проницаемости ϵ , седьмого слоя при толщине нарушенного шестого слоя $d_6 = 4$ мм (пенопласт): 1 – 1; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 9,6; 5 – 15

зом зависит от $t_{\text{м.иск}}$ в окрестности минимума этой зависимости в диапазоне толщин металлической (хром) пленки 0–20 нм.

Измерения проводились в диапазоне частот 8–12 ГГц. В качестве СВЧ фотонного кристалла использовалась 11-слойная структура из череду-

ющихся слоев поликора ($\epsilon = 9.6$) толщиной 1 мм и пенопласта ($\epsilon = 1.1$) толщиной 12 мм. На рис. 13 приведены результаты измерений $|R|^2$ от частоты f для различных значений толщины шестого слоя ($\epsilon = 1.1$) и толщины пленки хрома, нанесенной на поликоровую подложку.

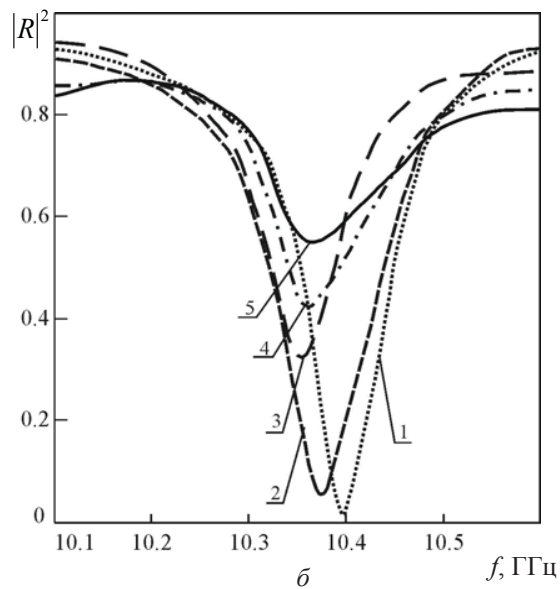
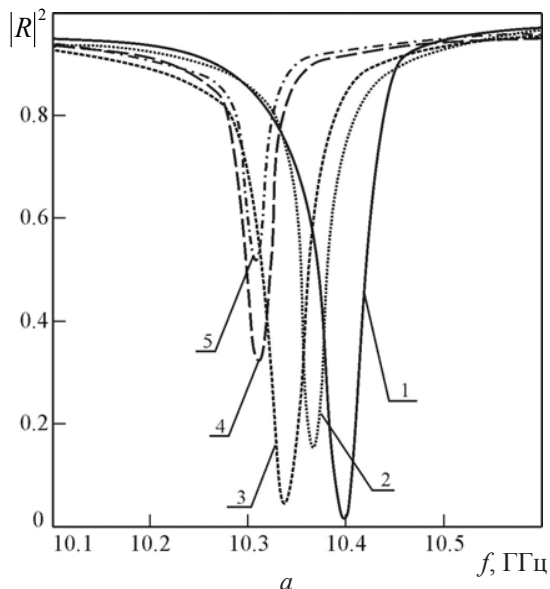


Рис. 13. Измеренные частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла при наличии в нем нарушения в виде шестого слоя (пенопласт) меньшей толщины ($d_6 = 4$ мм) для различных значений толщины нанометрового металлического слоя h при размещении фотонного кристалла: а – перед измеряемой структурой: 2 – 0; 3 – 21; 4 – 76; 5 – 144; б – после измеряемой структуры: 2 – 0; 3 – 12; 4 – 18; 5 – 21. Кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без измеряемой структуры



Как отмечалось выше, наибольший интерес в процессе создания полупроводниковых структур представляет одновременное измерение их толщины t и электропроводности σ . Нахождение этих параметров в результате решения обратной задачи СВЧ-методами осложняется тем, что существуют различные сочетания значений указанных параметров, при которых наблюдаются одинаковые частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения СВЧ-излучения. Для устранения такого рода неоднозначности решения авторы [24, 25] предложили проводить измерения при различных температурах. Температурная зависимость электропроводности полупроводников хорошо изучена, а изменением толщины в ограниченных температурных интервалах можно пренебречь. В результате было показано, что по измеренным при разных температурах зависимостям спектров отражения удалось определить одновременно оба этих параметра в структурах полупроводник–диэлектрик. Однако разрешающая способность этого метода по совокупности параметров t и σ оказывается сравнительно низкой. Так, для электропроводности кремния $\sigma = 1.087 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ в [24] приведено

$$S(t, \sigma) = \sum \left(\left(D(f, t, \sigma(T_0)) - D_{T_0\text{экс}} \right) + \left(R(f, t, \sigma(T_0)) - R_{T_0\text{экс}} \right) + \left(D(f, t, \sigma(T)) - D_{T_0\text{экс}} \right) + \left(R(f, t, \sigma(T)) - R_{T_0\text{экс}} \right) \right)^2.$$

Искомые значения t и σ определялись численным методом в результате решения системы уравнений

$$\frac{\partial S(\sigma)}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{\partial S(t)}{\partial t} = 0.$$

Для описания температурной зависимости σ для полупроводникового материала n -типа использовалось соотношение $\sigma = en\mu_n$, где e – заряд электрона, n – концентрация носителей заряда, μ_n – подвижность электронов. В окрестности комнатной температуры преобладает рассеяние на фононах, концентрация n остается практически неизменной, электропроводность определяется температурной зависимостью подвижности $\mu_n = AT^{-3/2}$, где A – постоянная величина. Таким образом, выражение для электропроводности примет вид

$$\sigma(T) = enA \cdot T^{-3/2}.$$

Тогда соотношение, определяющее электропроводность $\sigma(T)$ при температуре T , при извест-

значение $t = 360 \text{ мкм}$. При измерениях использовались структуры типа полупроводник–диэлектрик. В качестве диэлектрика использовался фторопласт. При толщинах, меньших 360 мкм, в рассматриваемом случае изменение температуры слабо изменяло частотную зависимость $|R|^2$.

В [26, 27] показано, что диапазон измеряемых толщин можно существенно расширить, если использовать одномерные СВЧ фотонные кристаллы, в которых роль дефекта, нарушающего периодичность, выполняет слой полупроводника с искомыми параметрами. Исследования проводились в диапазоне частот 8–12 ГГц, при расчете и в эксперименте использовался фотонный кристалл, состоящий из одиннадцати слоев. Нечетные слои выполнялись из поликора, четные – воздух. Толщина нечетных отрезков была 1 мм, а четных – 12 мм. Нарушение периодичности создавалось изменением толщины шестого слоя и введением между шестым и седьмым слоями полупроводникового материала (кремний). Толщина шестого слоя выбиралась равной 2 мм. Для определяемых искомой толщины t и электропроводности σ использовался метод наименьших квадратов с функцией невязки в виде

ной электропроводности σ_0 для температуры T_0 будет иметь вид

$$\sigma(T) = (T^{-3/2}/T_0^{-3/2}) \cdot \sigma_0.$$

На рис. 14 представлены частотные зависимости тестовых значений $|R|^2$ при $T = 298 \text{ К}$ и аналогичных расчетных зависимостей для одномерного 11-слоеного фотонного кристалла с толщиной его отрезков 1 мм.

Толщина нарушенного шестого слоя составляла 5 мм. Толщина измеряемого полупроводникового слоя при решении тестовых задач варьировалась от 0.1 до 10 мкм. Функция S для рассматриваемого случая представлена на рис. 15, а, соответствующая контурная карта, приведенная на рис. 15, б, характеризуется наличием замкнутых траекторий вблизи минимума, что подтверждает возможность одновременно определять толщину и электропроводность тонких полупроводниковых слоев описанным способом.

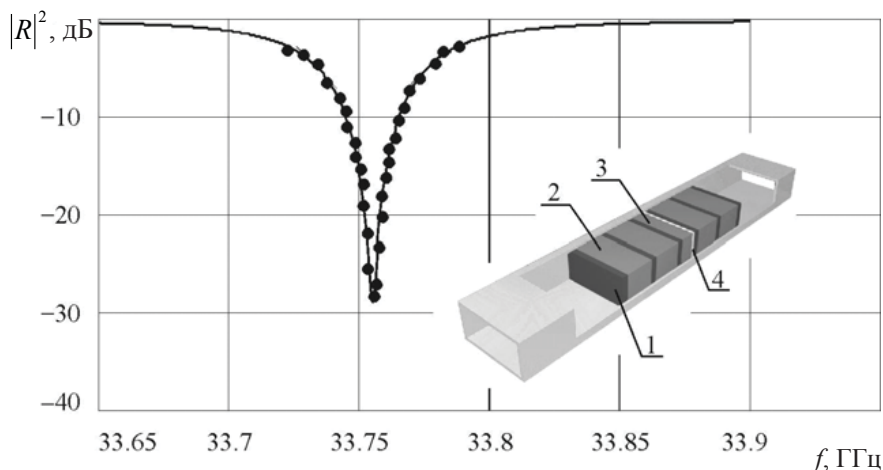


Рис. 14. Частотные зависимости тестовых (точки) и рассчитанных (линия) значений коэффициента отражения, полученные с использованием найденных значений параметров $t_{иск} = 0.105$ мкм и электропроводностью $\sigma_{иск} = 1008 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. На вставке: одномерный волноводный фотонный кристалл: 1 – слой полимера, 2 – слой воздуха, 3 – нарушенный воздушный слой, 4 – полупроводниковый слой

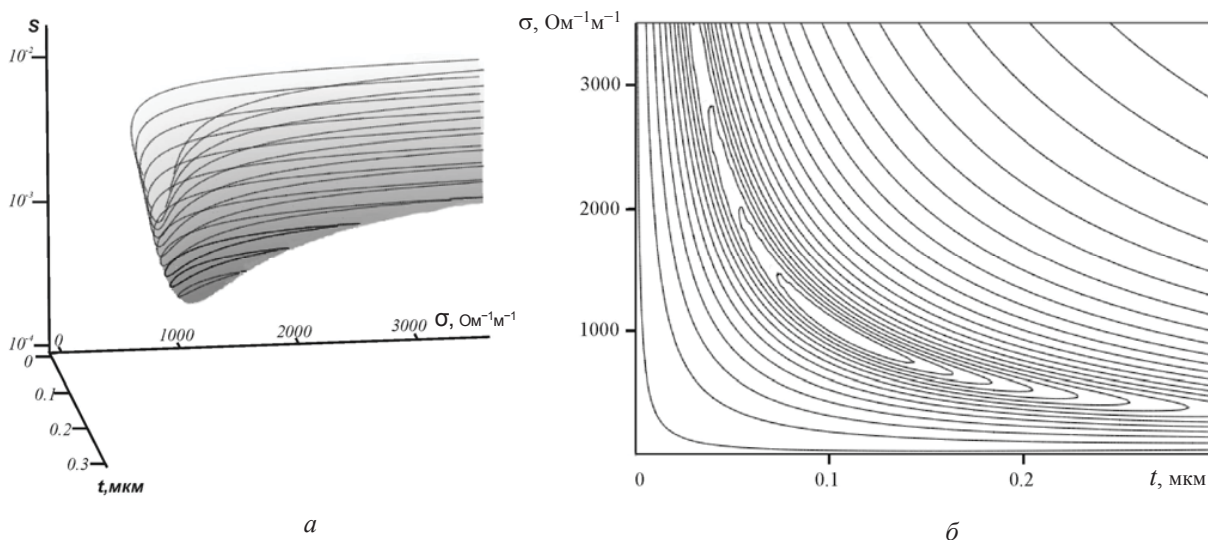


Рис. 15. Вид функции невязок в пространстве искомых параметров (а) и контурная карта функции невязок в плоскости искомых параметров t и σ (б) для полупроводникового слоя с толщиной $t_{иск} = 0.105$ мкм и электропроводностью $\sigma_{иск} = 1008 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

В [28, 29] для измерения σ и t при фиксированной температуре предложено изменять размеры нарушения периодичности фотонного кристалла, содержащего исследуемый образец, и положение образца внутри ячейки кристалла. Первая возможность реализации этого предложения состоит в измерении частотных зависимостей R и D при фиксированных расстояниях полупроводникового слоя от границы нарушенного центрального слоя фотонного кристалла и нахождения σ и t из условия минимума невязки S рассчитанных и экспериментальных значений

этих зависимостей, полученных для двух различных расстояний между измеряемым слоем и границей нарушенного слоя. Вторая возможность – нахождение минимума S при фиксированном расстоянии от полупроводникового слоя до границы, но при двух различных длинах ячейки с нарушением периодичности.

Для t от 100 до 500 мкм и σ от 1 до $10 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ и для t менее 100 мкм и σ более $1000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ на рис. 16 показано изменение конфигурации глобального минимума S , соответствующего искомым параметрам.

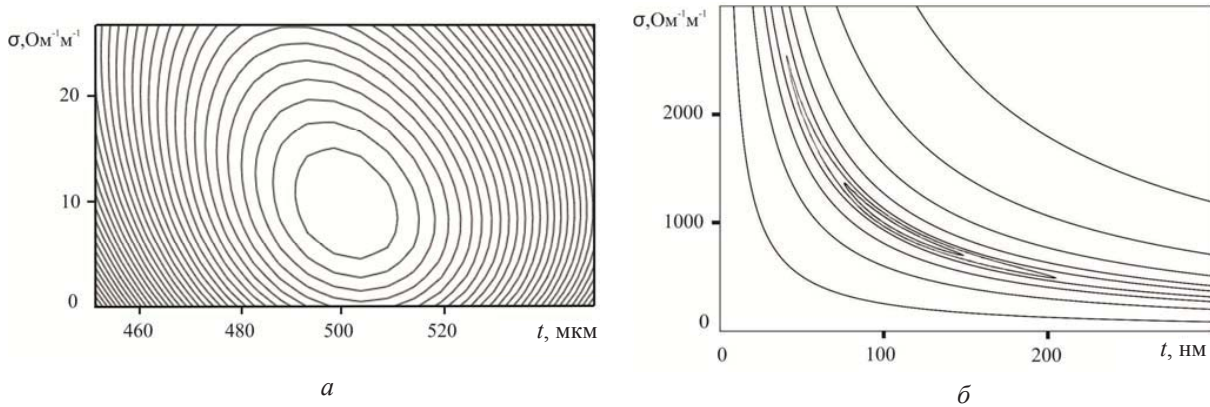


Рис. 16. Контурные карты функции невязки при изменении толщины и электропроводности полупроводникового слоя для случаев: $a - t = 500$ мкм, $\sigma = 10 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$; $b - t = 100$ нм, $\sigma = 1000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

Сделан вывод о том, что при $t < 100$ нм и $\sigma > 1000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ определение σ и t этим методом становится невозможным.

Частотные характеристики СВЧ фотонных кристаллов, как отмечалось, например, в [28], при большом числе N образующих их элементов ($N > 20$) слабо зависят от изменения этого числа. Размер отдельного элемента соизмерим с длиной волны электромагнитного излучения. В оптическом диапазоне размер фотонного кристалла мал, в том числе и при большом числе элементов. В СВЧ-диапазоне с целью уменьшения общих размеров устройств приходится обходиться минимальным числом элементов, достаточным для обеспечения функционирования. В то же время частотные характеристики таких устройств могут быть неоптимальными. Таким образом, задача создания СВЧ фотонных кристаллов, характеризующихся малыми размерами, представляет научный и практический интерес.

В [29] для решения такого рода задачи предложено в качестве элементов, периодическая последовательность которых образует СВЧ фотонный кристалл, использовать структуры, возбуждающие волны высших типов, длины волн которых существенно меньше длины волны основного типа. Примеры таких структур, названных низкоразмерными, приведены, в частности, в [30]. В [29] приведены результаты исследований характеристик СВЧ фотонных кристаллов, представляющих собой структуры из последовательных чередующихся диэлектрических слоев – четные элементы фотонного кристалла и тонких металлических пластин, частично перекрывающих сечение волновода

– нечетные элементы фотонного кристалла. Между пластинами и широкими стенками волновода имелись зазоры, одинаковые по ширине вдоль всей длины пластины. При этом зазоры между нечетными металлическими пластинами и волноводом создавались у одной из широких стенок волновода, а между четными – у противоположной стенки волновода. Таким образом, зазоры являлись источником высших типов волн, образующих в его окрестности ближнее поле. Изображение исследуемого СВЧ фотонного кристалла приведено на рис. 17.

Параметры элементов были выбраны таким образом, чтобы проявлялся «зонный» характер частотных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания. Результаты расчета методом конечных элементов S_{12} и S_{11} девятислойного фотонного кристалла, состоящего из пяти чередующихся металлических пластин с зазорами и четырех диэлектрических слоев при различных значениях толщины диэлектрических слоев h , представлены на рис. 18.

Уменьшение h , так же как и увеличение ширины зазора S , приводило к смещению частотной характеристики в высокочастотную область. При уменьшении h ширина разрешенной зоны увеличивалась, глубина и ширина запрещенной зоны уменьшались.

Экспериментально исследовался фотонный кристалл, созданный в соответствии с описанной выше моделью. На рис. 19 и рис. 20 представлены результаты экспериментальных исследований (сплошные кривые) S_{12} и S_{11} СВЧ фотонных кристаллов, состоящих из тонких металлических пластин с зазорами и диэлектрических слоев из пенополистирола ($\epsilon = 1.02$).

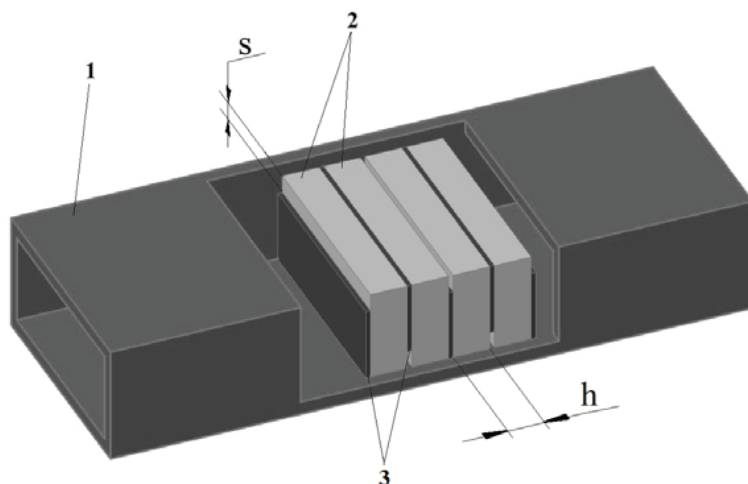


Рис. 17. Модель фотонного кристалла: 1 – отрезок прямоугольного волновода, 2 – слои диэлектрика, 3 – тонкие металлические пластины, S – ширина зазора, h – толщина слоя диэлектрика

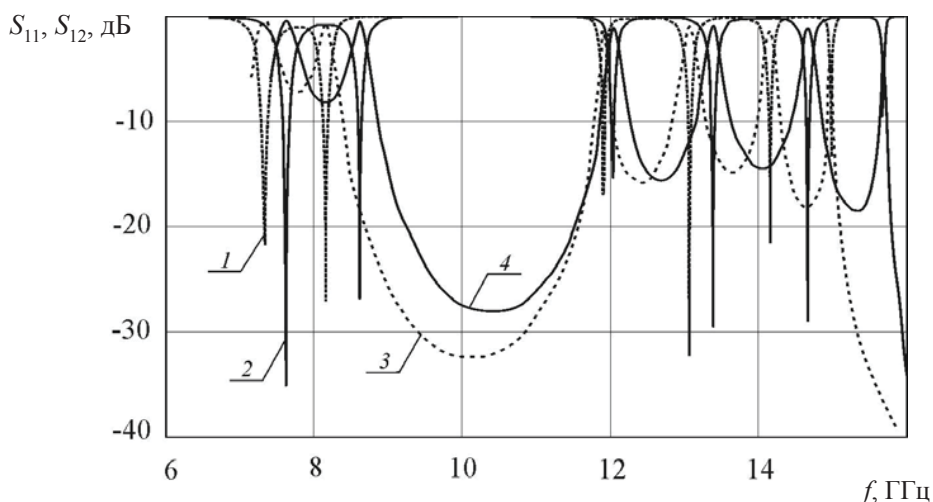


Рис. 18. Расчетные АЧХ коэффициентов отражения S_{11} (кривые 1 и 2) и пропускания S_{12} (кривые 3 и 4) 9-слойного фотонного кристалла, содержащего металлические пластины с шириной зазора $S = 1$ мм, при различных толщинах h диэлектрических слоев (фторопласт, $\epsilon = 2.1$). Кривые 1 и 3 – $h = 3.5$ мм. Кривые 2 и 4 – $h = 3$ мм

На этих же рисунках представлены результаты расчета частотных характеристик аналогичных фотонных кристаллов. Сравнение результатов расчета и эксперимента свидетельствует об их хорошем соответствии. Продольный размер созданного СВЧ фотонного кристалла составлял 12.25 мм, что примерно в пять раз меньше аналогичного размера структуры, рассчитанной для волны основного типа. СВЧ фотонные кристаллы в литературе часто называют структурами с запрещенной зоной.

Запрещенная зона может формироваться в результате многократного отражения от не-

однородности в микрополосковой структуре кольцевого типа [31]. Резонансная особенность в запрещенной зоне, называемая примесной модой колебаний [9, 32], или «окном прозрачности», достигается в [31] введением индуктивности, шунтирующей емкостной разрыв в верхней полоске микрополосковой линии. Размеры такого рода структур намного меньше размеров, описанных выше одномерных СВЧ фотонных кристаллов. Другая возможность уменьшения размеров периодических структур реализуется в системах встречно-штыревого типа, в том числе в микрополосковом исполнении [33, 34].

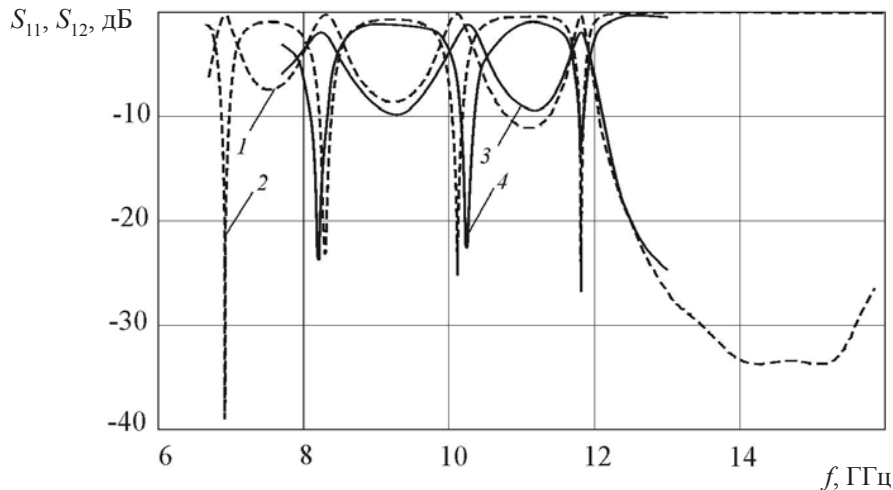


Рис. 19. Расчетные (штриховые кривые) и экспериментальные (сплошные кривые) АЧХ коэффициентов пропускания S_{12} (кривые 1 и 3) и отражения S_{11} (кривые 2 и 4) 9-слойного фотонного кристалла (число металлических пластин равно 5), содержащего диэлектрические слои из пенополистирола ($\epsilon = 1.02$) толщиной $h = 3$ мм, чередующиеся с металлическими пластинами с зазорами шириной $S = 1$ мм

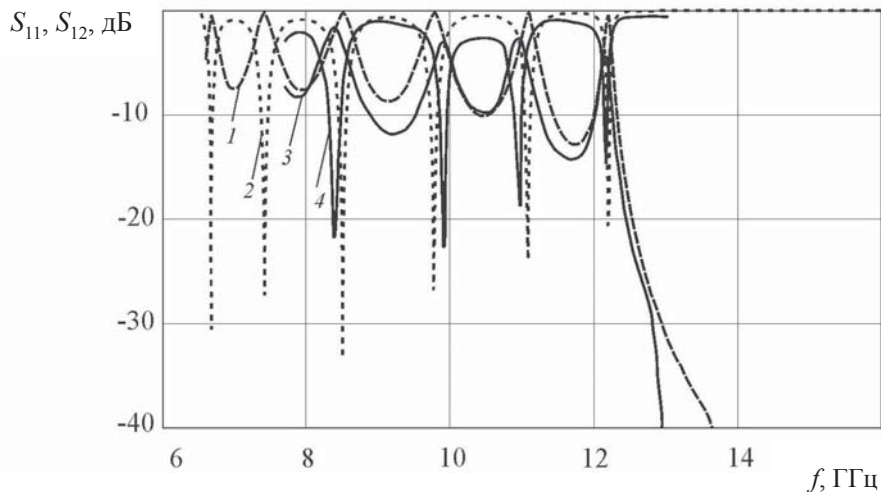


Рис. 20. Расчетные (штриховые кривые) и экспериментальные (сплошные кривые) АЧХ коэффициентов пропускания S_{12} (кривые 1 и 3) и отражения S_{11} (кривые 2 и 4) 9-слойного (число металлических пластин равно 5) фотонного кристалла, содержащего диэлектрические слои из пенополистирола ($\epsilon = 1.02$) толщиной $h = 3$ мм, чередующиеся с металлическими пластинами с зазорами шириной $S = 1$ мм

Представляет интерес создание волноводного устройства кольцевого типа с неоднородностью, которое характеризуется наличием запрещенной зоны. Для этого авторами [35] было предложено использовать волноводную линию передачи, содержащую диафрагму с системой рамочных элементов связи и неоднородности типа «штырь с зазором» (рис. 21).

Механизм их взаимодействия с СВЧ-излучением рассматривался, в частности, в [36,

37]. Наибольшее практическое значение такая конструкция может иметь для коротковолновой части СВЧ-диапазона. Численное моделирование системы проводилось с использованием метода конечных элементов в САПР HFSS ANSOFT. Из результатов расчетов, приведенных на рис. 22 [35], следует, что при длине рамки 21 мм и высоте 7 мм в диапазоне частот 8.8–10.2 ГГц в амплитудно-частотной характеристике образуется запрещенная зона.

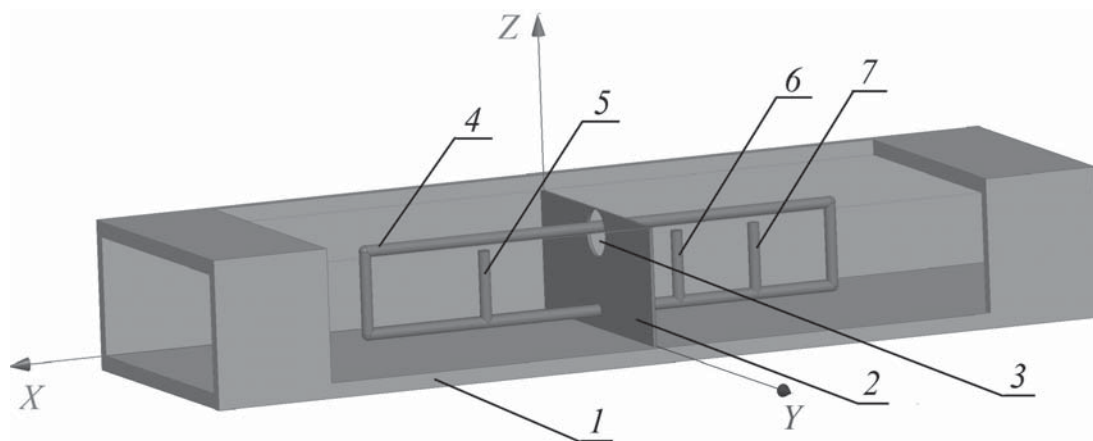


Рис. 21. Модель СВЧ-элемента на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, содержащей неоднородность в виде конструкций типа «штырь с зазором»: 1 – волновод, 2 – диафрагма, 3 – отверстие, 4 – рамочный элемент, 5–7 – неоднородности типа «штырь с зазором»

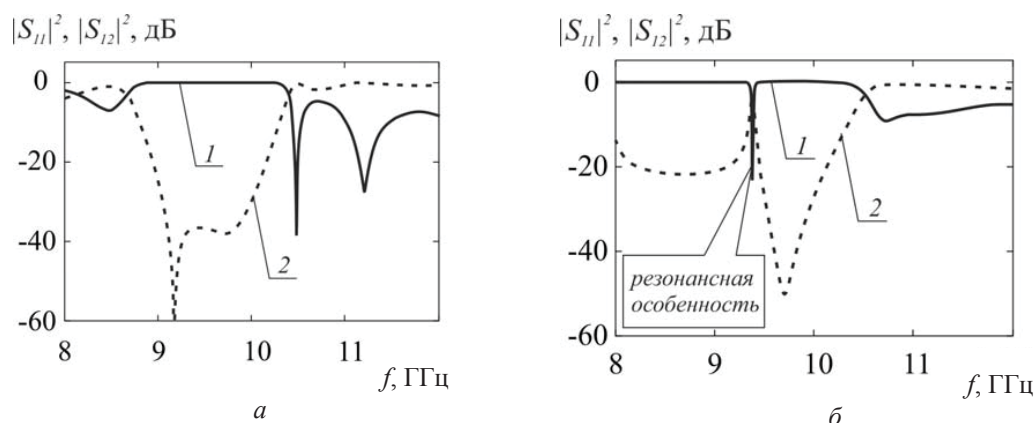


Рис. 22. Расчётные частотные зависимости коэффициента отражения (кривые 1) и коэффициента прохождения (кривые 2) СВЧ-устройства на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов: а – несодержащей неоднородности, б – содержащей неоднородности типа «штырь с зазором» [35]

Для создания в этой запрещенной зоне окна прозрачности (рис. 22, б) были введены неоднородности типа «штырь с зазором», выполненные из медной проволоки диаметром 1 мм.

В [35] расчетным путем показано, что при длине рамочных элементов 30 мм в диапазоне частот 8–12 ГГц возможна реализация «разрешенной зоны», в которой при наличии неоднородности в конструкции типа «штырь с зазором» возникает пик запираения. Результаты расчета амплитудно-частотных характеристик коэффициента прохождения вблизи пика запираения представлены на рис. 23.

Авторы [38] отмечали актуальность электронной перестройки спектральных зависимостей СВЧ фотонных кристаллов. В экспериментах в диапазоне частот 7.8÷12.5 Гц они исполь-

зовали слоистые структуры из металлических дисков и узких металлических (алюминиевых) полосок, пенопласта, пластин поликора толщиной 1 мм и поликристаллического железитриевого граната. В [38] показана возможность формирования узкой ($\approx 0,5$ ГГц) полосы пропускания при потерях не более 6 дБ и запираения $\sim 40\div 43$ дБ. Эти полосы могут перестраиваться изменением величины магнитного поля.

Для управления величиной пропускания в окне прозрачности фотонного кристалла авторами [39, 40] использовался одномерный 11-слойный фотонный кристалл, представляющий собой чередующиеся слои поликора и пенопласта. В кристалл вводилось нарушение в виде шестого слоя уменьшенной толщины. В качестве управляющего элемента в [39, 40]

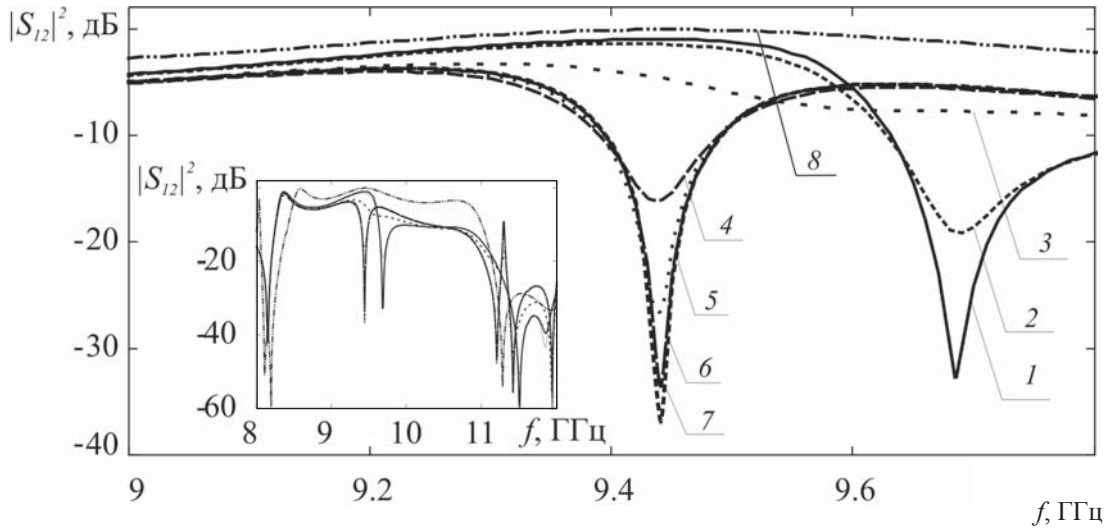


Рис. 23. Расчётные амплитудно-частотные характеристики коэффициента прохождения вблизи пика запирающей разрешённой зоны СВЧ-элемента с неоднородностью типа «штырь с зазором» и $n-i-p-i-n$ -структурой: 1 – $\sigma = 10^{-3}$ см/м, 2 – $\sigma = 1.0$ см/м, 3 – $\sigma = 10.0$ см/м, 4 – $\sigma = 10^2$ 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

использовалась $p-i-n$ -диодная матрица типа М34216-1. К матрице прикладывалось управляющее напряжение U в диапазоне $0 \div 700$ мВ.

Экспериментальные частотные зависимости модуля и фазы коэффициентов отражения приведены на рис. 24.

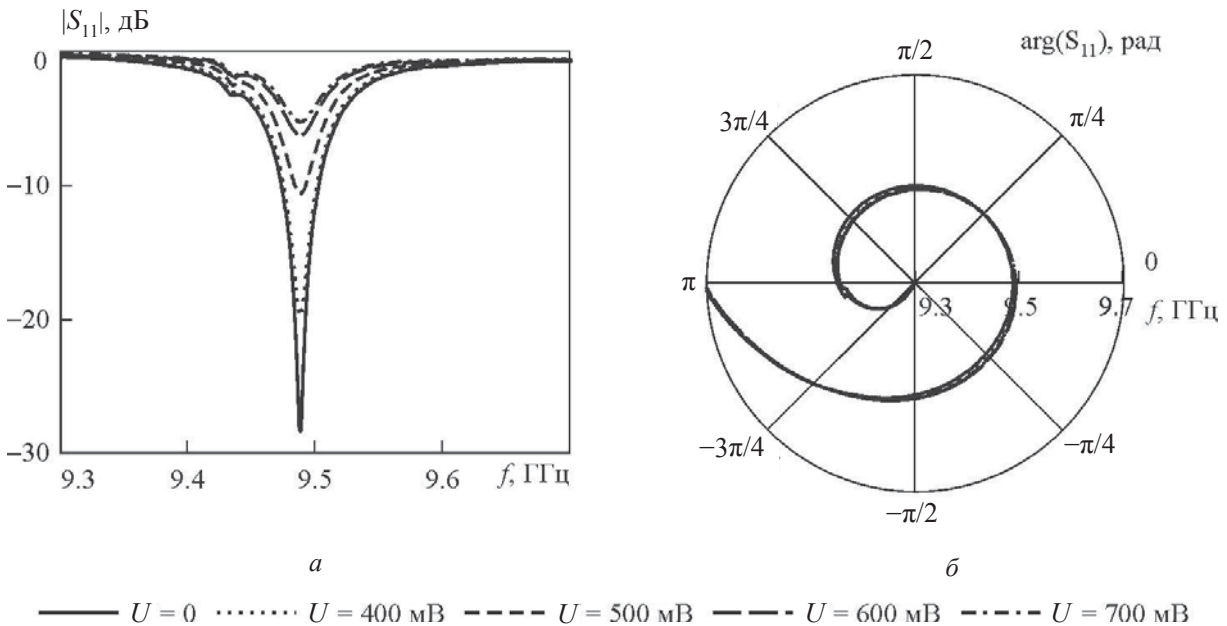


Рис. 24. Экспериментальные зависимости модуля (а) и фазы (б) коэффициента отражения электромагнитного излучения в области окна прозрачности фотонного кристалла для различных значений величины напряжения на $p-i-n$ -диоде, $d_6 = 5.0$ мм

Полученные результаты свидетельствуют о возможности регулирования пропусканием от 1.5 до 25 дБ с малой величиной фазовой ошибки. В [40] описана возможность электрического

управления частотными характеристиками микрополоскового фотонного кристалла. На частоте 6.9 ГГц наблюдалось переключение потерь затухания с максимальным значением более 60 дБ.



Введение в зазор стержневого держателя системы из связанных рамочных элементов описанной в [35] $n-i-p-i-n$ -структуры позволило регулировать коэффициент пропускания на частоте 9.644 ГГц в диапазоне 1.5–25 дБ.

В последние несколько десятилетий получили распространение методы измерения параметров материалов и структур, основанные на использовании ближнеполевых сканирующих СВЧ-микроскопов. Основным элементом таких микроскопов авторы [41] назвали связанный с зондом СВЧ-резонатор. В [42] приведены ре-

зультаты исследований использования в качестве резонансной системы цилиндрического резонатора с рамочным элементом связи и одномерным фотонным кристаллом с нарушением периодичности (рис. 25).

Использование предложенного устройства позволило достичь чувствительности при измерении диэлектрической проницаемости ϵ в диапазоне значений $\epsilon=1-2$ в 29.7 дБ/ ϵ и чувствительности при измерении толщины металлических пластин 1.35 дБ/нм в диапазоне толщин ≤ 20 нм.

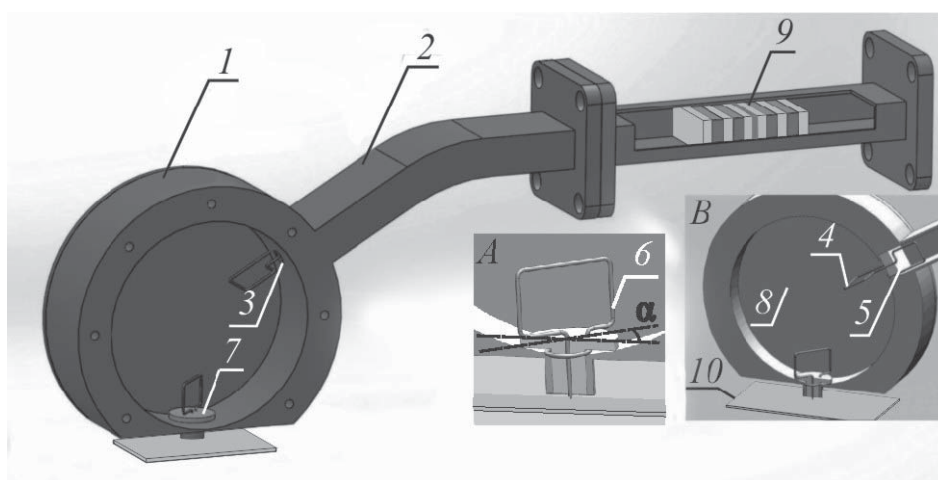


Рис. 25. Зонд ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе цилиндрического СВЧ-резонатора 1 с рамочным элементом связи 6 и одномерным фотонным кристаллом 9. Вставка А – рамочный элемент связи. Вставка В – цилиндрический СВЧ-резонатор с рамочным элементом связи и измеряемым образцом 10

В заключение можно отметить еще одну возможную сферу применения СВЧ фотонных кристаллов: использование результатов исследования их характеристик для объяснения эффектов, наблюдающихся в низкоразмерных периодических структурах. Здесь можно использовать имеющуюся аналогию между сверхрешетками, оптическими фотонными кристаллами и СВЧ фотонными кристаллами для постановки экспериментов, позволяющих наблюдать эффекты, характерные для полупроводниковых структур, в виде, свободном от многофакторного влияния технологии их изготовления, необходимости одновременного учета сосуществования большого числа эффектов, характерных для полупроводников. Использование такой аналогии может послужить основой для выработки полезных рекомендаций при

создании периодических наноструктур, выявления роли факторов, влияющих на их рабочие характеристики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1376 и 1575) и стипендии Президента РФ (СП – 2622.2015.3).

Список литературы

1. Joannopoulos I. D., Villeneuve Pierre R., Fan S. Photonic crystals : putting a new twist on light // Nature. 1997. Vol. 386, № 13. P. 143–149.
2. Yablonovitch E., Gmitter T. J., Leung K. M. Photonic band structure : The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms // The American Physical Society. 1991. Vol. 67, № 17. P. 2295–2298.
3. Силин Р. А., Сазонов В. П. Замедляющие системы. М. : Сов. радио, 1966. 631 с.



4. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М. : Наука, 1973. 342 с.
5. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals // Progress in Electromagnetics Research. 2003. Vol. 41. P. 185–209.
6. 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.
7. Burns G. W., Thayne I. G., Arnold J. M. Improvement of Planar Antenna Efficiency When Integrated With a Millimetre-Wave Photonic // Proc. of European Conf. on Wireless Technology. Amsterdam, Netherlands, 2004. P. 229–232.
8. Wu Hsien-Shun, Tzuang Ching-Kuang C. Miniaturized High-Gain Synthetic Rectangular Waveguide Antenna of Near-Omnidirectional Radiation // Proc. of 34rd European Microwave Conf. Amsterdam, Netherlands, 2004. Vol. 2. P. 1189–1192.
9. Беляев Б. А., Волошин А. С., Шабанов В. Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах // Докл. АН. 2005. Т. 403, № 3. С. 319–324.
10. Helszajn J. Passive and Active Microwave Circuits. N.Y. ; Chichester ; Brisbane ; Toronto : John Wiley & Sons, 1978. 140 p.
11. Lee K. A., Guo Y., Stimson Ph. A., Potter K. A., Jung-Chih Chiao, Rutledge D. B. Thin-Film Power-Density Meter for Millimeter Wavelengths // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1991. Vol. 39, № 3. P. 425–428.
12. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Скворцов В. С., Мерданов М. К. Широкополосные волноводные согласованные нагрузки на основе фотонных кристаллов с нанометровыми металлическими слоями // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2009. № 1. С. 73–80.
13. Широкополосная волноводная согласованная нагрузка : пат. 2360336 Рос. Федерация : МПК H01P 7/00 / Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Скворцов В. С., Мерданов М. К.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского». – № 2008106244/09; заявл. 21.02.09; опубл. 27.06.09, Бюл. № 18. 8 с.
14. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения // ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 5. С. 112–117.
15. Чаплыгин Ю. А., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С. Методика измерения электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения // Изв. вузов. Электроника. 2006. № 6. С. 27–35.
16. Usanov D. A., Skripal A. V., Abramov A. V., Bogolyubov A. S., Kalinina N. V. Measurements of thickness of metal films in sandwich structures by the microwave reflection spectrum // Proc. of 36rd European Microwave Conf. Manchester, UK, 2006. P. 921–924.
17. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Скворцов В. С., Мерданов М. К. Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках // Изв. вузов. Электроника. 2007. № 6. С. 25–32.
18. Yablonoitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58, № 20. P. 2059–2062.
19. Oliyik V., Makarov D., Danilov V. Dielectric permeability measurements with waveguide bragg structure usage // Proc. of 15th Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2005). Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2005. P. 785–786.
20. Usanov D., Skripal A., Abramov A., Bogolubov A., Skvortsov V., Merdanov M. Measurement of the Metal Nanometer Layer Parameters on Dielectric Substrates using Photonic Crystals based on the Waveguide Structures with Controlled Irregularity in the Microwave Band // Proc. of 37rd European Microwave Conf. Munich, Germany, 2007. P. 198–201.
21. Usanov D. A., Skripal A. V., Abramov A. V., Bogolubov A. S., Kulikov M. Y. Application of waveguide and microstrip photonic crystals for measurement of parameters of materials and structures // XVII Intern. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications. Poland, Wroclaw, 2008. Vol. 3. P. 904–907.
22. Способ измерения электрофизических параметров структуры «нанометровая металлическая пленка–полупроводниковая или диэлектрическая подложка : пат. 2349904 Рос. Федерация : МПК G01N 22/00 / Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Скворцов В. С., Мерданов М. К.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского». – № 2007134239/09; заявл. 13.09.07; опубл. 20.03.09, Бюл. № 8. 8 с.
23. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Куликов М. Ю., Скворцов В. С., Мерданов М. К. СВЧ-фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов и создания функциональных устройств СВЧ-электроники // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11, № 3. С. 51–59.
24. Способ определения электропроводности и толщины полупроводниковых слоев : пат. 2439541 Рос. Федерация : МПК G01N 22/00 / Усанов Д. А., Постельга А. Э.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского». – № 2010128130/07; заявл. 08.07.10; опубл. 10.01.12, Бюл. № 1. 10 с.



25. Усанов Д. А., Постельга А. Э., Сысоев Н. Ю. Определение электропроводности и толщины полупроводниковых слоев по спектру отражения СВЧ-излучения // Изв. вузов. Электроника. 2011. № 4(90). С. 71–77.
26. Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Постельга А. Э., Пономарев Д. В. Определение параметров тонких полупроводниковых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов // Докл. АН. 2012. Т. 443, № 3. С. 1–3.
27. Способ определения электропроводности и толщины полупроводниковых пластин или нанометровых полупроводниковых слоев в структурах «полупроводниковый слой–полупроводниковая подложка»: пат. 2517200 Рос. Федерация: МПК G01N 22/00, B82B 3/00, H01L 21/66 / Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского». – № 2012137649/07; заявл. 03.09.2012; опубл. 10.03.2014, Бюл. 15. 14 с.
28. 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 // Докл. АН. 2013. Т. 448, № 1. С. 35–37.
29. Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Посадский В. Н., Тяжлов В. С., Байкин А. В. Низкоразмерные волноводные СВЧ фотонные кристаллы // Докл. АН. Т. 448, № 4. Январь 2014. С. 406–409.
30. Усанов Д. А., Горбатов С. С. Эффекты ближнего поля в электродинамических системах с неоднородностями и их использование в технике СВЧ. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2011. 392 с.
31. Sung-II Kim, Mi-Young Jang, Chul-Sik Kee, Ikmo Park, H. Lim. Characteristics of microwave filters based on microstrip photonic bandgap ring structures // Current Applied Physics. 2005. № 5. P. 619–624.
32. Yablonovitch E., Gmitter T. J., Meade R. D., Rappe A. M., Brommer K. D., Joannopoulos J. D. Donor and acceptor modes in photonic band structure // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67, № 24. P. 3380.
33. Беляев Б. А., Сержантов А. М., Бальва Я. Ф., Лексиков А. А., Галеев Р. Г. Новая конструкция миниатюрного микрополоскового резонатора на основе встречно-штыревой структуры // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 22. С. 52–60.
34. Беляев Б. А., Сержантов А. М., Бальва Я. Ф., Лексиков А. А., Галеев Р. Г. Новая конструкция микрополоскового фильтра на микрополосковых резонаторах со встречно-штыревой структурой проводников // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 10. С. 89–96.
35. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Фролов А. П., Орлов В. Е. Волноводы, содержащие рамочные элементы с электрически управляемыми характеристиками разрешенных и запрещенных зон // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 11. С. 1079–1084.
36. Усанов Д. А., Орлов В. Е., Безменов А. А. Рамочные элементы связи в волноводе // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1976. Вып. 5. С. 83–89.
37. Усанов Д. А., Орлов В. Е. Использование рамочной связи в полупроводниковых устройствах для управления СВЧ-мощностью // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1975. Вып. 1. С. 35–37.
38. Бритун Н. В., Данилов В. В. Электронное управление параметрами структур с фотонной запрещенной зоной // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, вып. 7. С. 27–32.
39. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Скворцов В. С., Мерданов М. К. Волноводные фотонные кристаллы с характеристиками, управляемыми $p-i-n$ -диодами // Изв. вузов. Электроника. 2010. № 1. С. 24–29.
40. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Куликов М. Ю. Управляемые pin -диодами фотонные кристаллы и их применение // Антенны. 2012. № 3. С. 9–14.
41. Anlage S. M., Steinhauer D. E., Feenstra B. J., Vlahacos C. P., Wellstood F. C. Near-field microwave microscopy of materials properties // Microwave Superconductivity / eds. H. Weinstock, M. Nisenoff. Amsterdam, Netherlands: Kluwer, 2001. P. 239–269.
42. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Фролов А. П. Ближнеполевой сверхвысокочастотный микроскоп на основе фотонного кристалла с резонатором и регулируемым элементом связи в качестве зонда // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58, № 12. С. 1071–1078.