

УДК 537.874

PACS numbers: 81.05.Xj,
78.67.Pt

В. В. ХАРДИКОВ^{1,2}, С. Л. ПРОСВИРНИН^{1,2}, В. И. БЕЗБОРОДОВ³,
О. С. КОСЯК³, Е. М. КУЛЕШОВ³, С. В. МИЗРАХИ³,
М. И. НАХИМОВИЧ³, П. К. НЕСТЕРОВ³, И. А. НЕСТЕРОВ³

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина

² Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
E-mail: khav77@gmail.com

³ Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина

РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТАСЛОЯ

Предмет и цель работы: Исследуются резонансные свойства диэлектрического метаслоя в виде периодической в двух перпендикулярных направлениях структуры, которая состоит из кремниевых прямоугольных параллелепипедов, размещенных на плоской кварцевой подложке.

Методы и методология работы: С помощью псевдоспектрального метода во временной области выполнено численное моделирование взаимодействия метаслоев с электромагнитной волной. Экспериментальное исследование резонансных свойств метаслоев проводилось в диапазоне 52 ÷ 73 ГГц на основе измерения частотных характеристик прошедшего поля в квазиоптическом измерительном тракте. Экспериментальный образец был изготовлен методом механической резки слоистой кремний-кварцевой структуры алмазным диском. Особенностью исследуемой структуры является двухслойность элементов периодического метаслоя. Каждый из элементов имеет форму прямоугольного бруса и состоит из верхнего кремниевого параллелепипеда и нижнего – кварцевого. Высота верхней части брусьев в процессе исследований изменялась (метаслой шлифовывался с кремниевой стороны).

Результаты работы: Предложена новая удобная для изготовления конструкция метаслоя, в которой возможно возбуждение нескольких высокочастотных резонансов. Резонансы связаны с формированием в диэлектрических элементах и подложке распределений полей, характерных для продольных магнитного и диэлектрического диполя. Свойства этих резонансов по-разному зависят от высоты брусьев, что позволяет управлять резонансными свойствами структуры путем выбора высоты их кремниевой части. Экспериментальные исследования подтвердили свойства резонансов магнитного типа, предсказанные теоретически.

Заключение: Выполненные теоретические и экспериментальные исследования показали возможность создания полностью диэлектрических резонансных метаслоев для использования в терагерцовом диапазоне.

Ключевые слова: диэлектрический метаслой, периодическая структура, кремний, кварц, резонанс прохождения, резонанс поглощения

1. Введение

Плоские метаматериалы (метаслои) для микроволнового диапазона обычно изготавливают в виде решеток из металлических элементов сложной формы, периодически размещенных на тонкой диэлектрической подложке [1], или, в соответствии с принципом Бабинне, в виде металлической пластины со щелями сложной формы [2]. Придавая сложную форму элементам структуры, удается в периодической ячейке с размером меньше длины волны обеспечить условия для резонансного возбуждения поля. Типичный элемент метаслоя представляет собой резонансное металлическое кольцо с разрывом.

К сожалению, масштабирование таких структур в инфракрасный и тем более в оптический диапазон встречает серьезные препятствия. Основное из них – это большие диссипативные потери, присущие металлам в оптическом диапазоне, которые не дают возможности получить добротный резонансный отклик периодической структуры.

Перспективный путь решения этой проблемы состоит в замене металлических резонансных элементов диэлектрическими с малыми потерями и проектировании полностью диэлектрических метаслоев [3]. Для прогресса в этой области необходимы детальные исследования резонансных свойств двухпериодических полностью диэлектрических структур. В настоящее время технологии изготовления периодических структур, резонансных в оптическом или ближнем инфракрасном диапазоне длин волн, являются малодо-

© В. В. Харди́ков, С. Л. Просви́рнин, В. И. Безборо́дов,
О. С. Ко́сяк, Е. М. Куле́шов, С. В. Мизра́хи,
М. И. Нахи́мович, П. К. Несте́ров, И. А. Несте́ров, 2016

ступными и дорогими. Однако принципиальных препятствий для масштабирования в этом случае нет. Поэтому мы выбрали для исследования резонансных свойств полностью диэлектрических метаслоев миллиметровый диапазон.

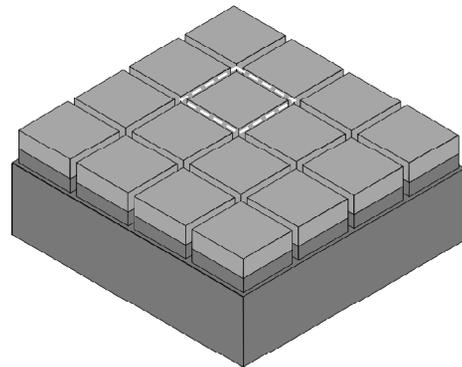
Целью работы является теоретическое (с помощью численного моделирования) и экспериментальное исследование резонансных свойств диэлектрического метаслоя в виде периодической в двух перпендикулярных направлениях структуры, которая состоит из кремниевых прямоугольных параллелепипедов, размещенных на плоской кварцевой подложке.

2. Постановка задачи

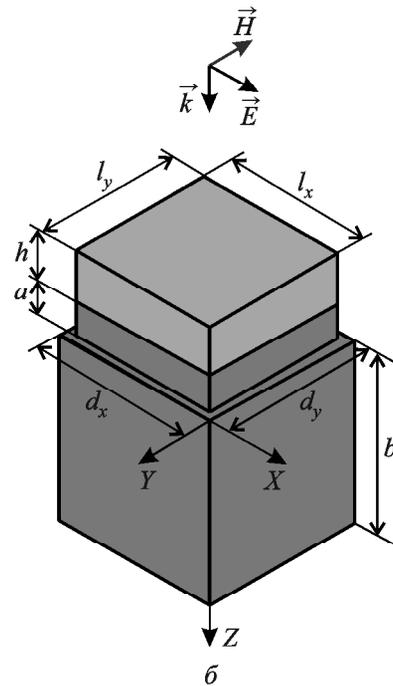
Задача состоит в исследовании резонансных частотных зависимостей коэффициентов прохождения, отражения и поглощения субволновой структуры в виде плоского периодического массива диэлектрических брусьев с прямоугольной периодической ячейкой $d_x \times d_y$, расположенного на кварцевой подложке. Экспериментальные исследования выполнялись в полосе частот от 52 до 73 ГГц. Для того чтобы в эту полосу частот попали основные наиболее длинноволновые резонансы в структуре выбраны размеры ее периодической ячейки $d_x = 2.4$ мм, $d_y = 2.3$ мм.

Для изготовления решетки использовалась технология механической резки при помощи алмазного диска. На слой кварца марки КИ толщиной 3.1 мм наклеивался слой кремния толщиной 1.0 мм, после чего в полученной слоистой структуре алмазным диском нарезались периодические системы щелей в направлении осей Ox и Oy . Для того чтобы при резке щелей брусья из кремния не отделялись от кварцевой подложки, алмазный диск погружался на глубину $a = 0.5$ мм в подложку. В результате на поверхности слоя из кварца (на кварцевой подложке толщиной $b = 2.6$ мм) формировался периодический массив из двухслойных прямоугольных брусьев. Каждый отдельный брус состоял из верхнего слоя кремния толщиной h и нижнего слоя кварца толщиной $a = 0.5$ мм. Фрагмент периодической структуры, изображение периодической ячейки с обозначениями ее размеров и фотография изготовленного образца структуры показаны на рис. 1.

Кремниевая часть бруса имеет форму прямоугольного параллелепипеда со сторонами $l_x \times l_y \times h$, а кварцевая – со сторонами $l_x \times l_y \times 0.5$ мм



а



б



в

Рис. 1. Диэлектрический метаслой: а – фрагмент метаслоя размером 4×4 периодических ячейки (штриховой линией показана периодическая ячейка); б – эскиз периодической ячейки с обозначениями размеров; в – фотография изготовленного образца метаслоя в измерительной кассете

($l_x = 2.15$ мм, $l_y = 2.05$ мм). Для исследования зависимости резонансных свойств решетки от толщины кремниевого слоя ее поверхность шлифовалась до требуемой толщины h .

На метаслой со стороны $z < 0$ (область 1) или $z > 0$ (область 2) нормально падает плоская x -поляризованная электромагнитная волна. Ниже свойства структуры описываются матрицей рассеяния s . Индексы ее элементов соответствуют номерам областей, в которых рассматривается падающее и рассеянное поле.

3. Численное исследование резонансных свойств диэлектрической структуры

Численное моделирование рассеяния электромагнитных волн на периодической структуре выполнялось с помощью псевдоспектрального метода во временной области [4].

Известно [5, 6], что в отдельном диэлектрическом бруске возможно возбуждение двух основных типов резонансов. Первый из них формируется при резонансном возбуждении колебания с распределением поля, подобного полю электрического диполя (ED). Второй резонанс связан с возбуждением колебания с распределением поля практически таким же, как у магнитного диполя (MD). Структура поля в бруске на частотах этих резонансов схематически показана на рис. 2.

В рассматриваемом нами случае периодической структуры за счет взаимного влияния брусков в решетке возбуждаются коллективные колебания подобных типов.

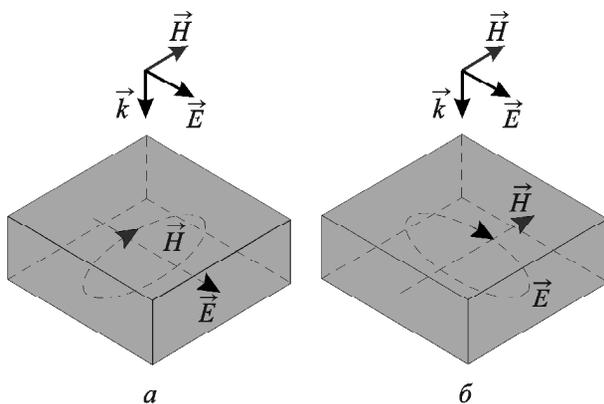


Рис. 2. Схематическое изображение распределения полей в бруске при возбуждении в нем электрического дипольного ED (а) и магнитного дипольного MD (б) резонансов

Любой резонанс в структуре связан с возрастанием в ней напряженности электрического поля, что приводит к росту диссипативных потерь энергии. Поэтому наличие или отсутствие резонансов при численных исследованиях свойств метаслоев удобно определять именно по частотным зависимостям коэффициентов поглощения структуры $A_1 = 1 - |s_{11}|^2 - |s_{21}|^2$ и $A_2 = 1 - |s_{22}|^2 - |s_{12}|^2$ при падении плоской волны со стороны $z < 0$ и $z > 0$ соответственно. Здесь s_{ij} – элементы матрицы рассеяния: s_{11} , s_{22} и s_{21} , s_{12} – коэффициенты отражения и прохождения соответственно. Особенно это важно в случае, когда диссипация энергии в структуре велика и на амплитудно-частотных зависимостях коэффициентов отражения и прохождения резонансы могут проявляться крайне слабо. Однако частотные зависимости коэффициентов поглощения дают возможность отлично идентифицировать их. Поэтому здесь и далее при численном моделировании резонансные частоты метаслоя определялись по частотам максимумов поглощения, а типы резонансов – в результате исследования распределения полей в структуре на этих частотах.

Поскольку метаслой имеет сложную периодическую структуру, для анализа его резонансных свойств целесообразно вначале рассмотреть отдельно резонансы в кварцевой подложке без кремниевых элементов.

Кварцевая подложка, в свою очередь, имеет сложную периодическую форму верхней поверхности (прямоугольные параллелепипеды с высотой $a = 0.5$ мм, расположенные на плоском слое кварца, толщина которого $b = 2.6$ мм, см. рис. 1, б). Показатель преломления кварца в рабочем диапазоне составляет 1.98, а уровень диэлектрических потерь характеризуется параметром $\text{tg}\delta = 0.0005$, частотная дисперсия этих величин незначительная и в расчетах не учитывалась. Результаты численного моделирования рассеяния на такой подложке без кремниевых брусков представлены на рис. 3. На частотных зависимостях легко видеть низкочастотный интерференционный резонанс подложки на частоте 52.5 ГГц, который соответствует максимуму коэффициента поглощения структуры (рис. 3, б). Интерференционная природа этого резонанса следует из анализа распределений полей. Максимуму интерференционного поглощения отвечают условия запирающей структуры, т. е. минимум

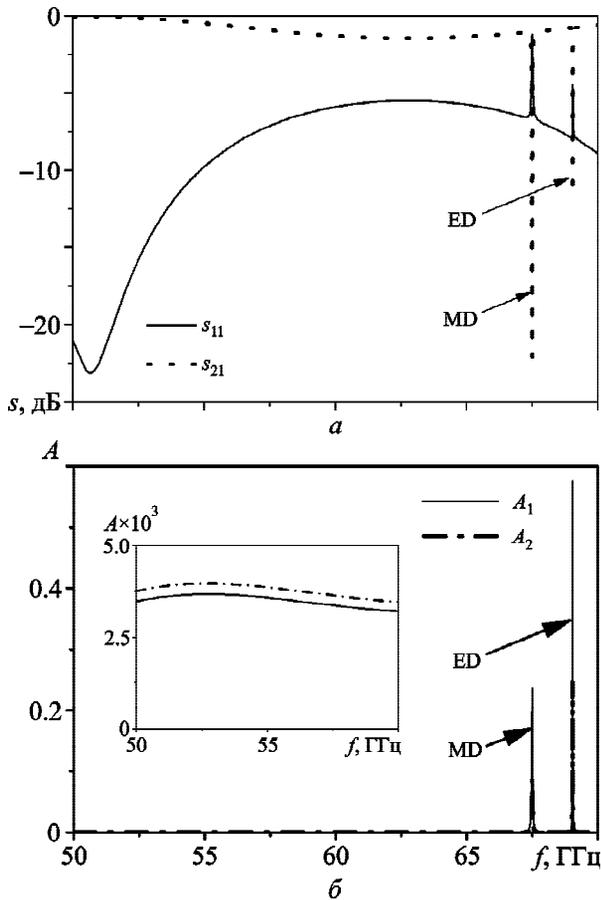


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения (а) и коэффициента поглощения (б) структуры без кремниевых брусьев ($h = 0$)

коэффициента отражения $|s_{11}|$. Его частота несколько ниже частоты максимума поглощения.

Кроме того, на частотах 67.48 и 69.05 ГГц формируются два дополнительных резонанса в результате возбуждения в периодической ячейке подложки поля со структурой магнитного и электрического дипольных резонансов соответственно. Эквивалентные дипольные моменты параллельны плоскости решетки и направлены вдоль оси Oy в случае магнитного (MD) и вдоль оси Ox в случае электрического (ED) резонансов. Этот факт подтверждается формированием петли электрического поля в плоскости xOz на частоте 67.48 ГГц и петли магнитного поля в плоскости yOz на частоте 69.05 ГГц (см. рис. 4). Для построения векторных распределений полей здесь и далее была использована программа HFSS.

Очевидно, что эти собственные резонансы решетчатой подложки сохраняются и при наличии на ее поверхности брусьев из кремния. Наличие

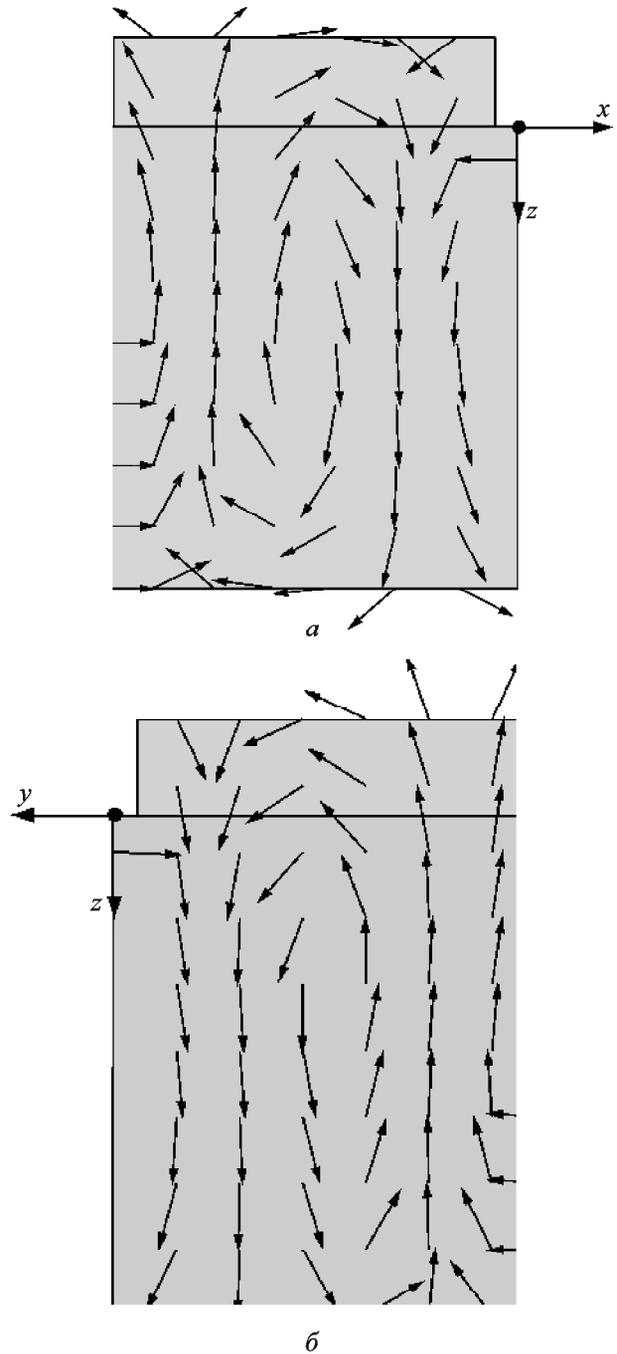


Рис. 4. Распределения электрического поля на частоте 67.48 ГГц в плоскости xOz (а) (MD резонанс) и магнитного поля на частоте 69.05 ГГц в плоскости yOz (б) (ED резонанс) решетчатой подложки без кремниевых брусьев ($h = 0$)

последних изменяет граничные условия на решетчатой поверхности подложки, что приводит к смещению резонансных частот рассматриваемых типов колебаний, но не разрушает их.

Результаты численного моделирования рассеяния на кремниевом-кварцевом метаслое пред-

ставлены на рис. 5 в случае $h = 0.9$ мм. Для численного моделирования были выбраны известные табличные данные для электрических свойств чистого кремния [7]: показатель преломления 3.42, уровень диэлектрических потерь соответствует $\text{tg}\delta = 0.001$. Дисперсия параметров кремния в рабочем диапазоне частот незначительна и поэтому не учитывалась.

Анализ резонансных свойств кремниво-кварцевой структуры показал, что в ней наряду с формированием двух уже упомянутых типов резонансов (интерференционного типа и резонансов решетчатой подложки ED_2 и MD_2) в рабочем диапазоне частот возможно возбуждение двух дополнительных резонансов запираения (ED_1 и MD_1 на рис. 5). Эти два дополнительных низкочастотных резонанса связаны с возбуждением в кремниевом бруске продольных электрического (на частоте 55.2 ГГц) и магнитного (на частоте

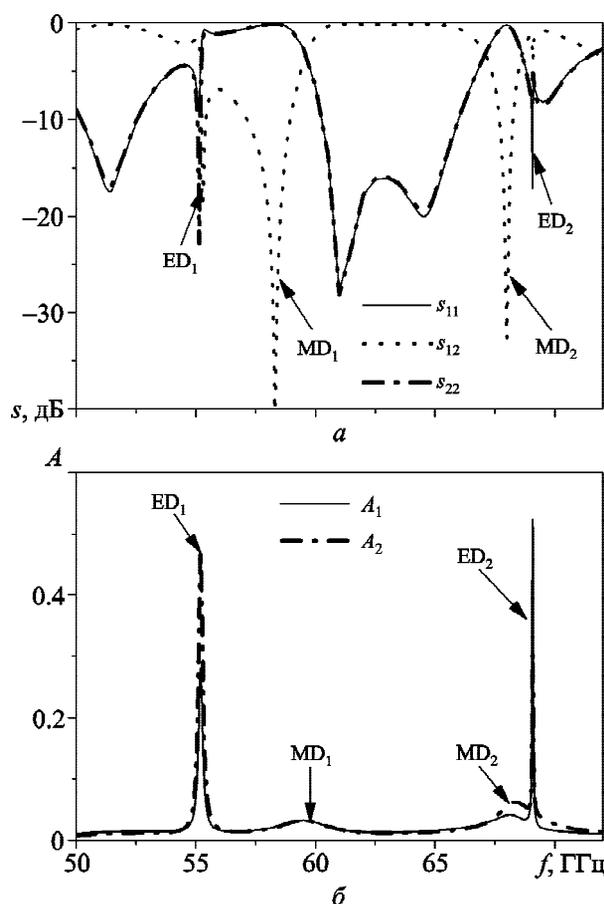


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения (а) и коэффициента поглощения (б) кремний-кварцевого метаслоя с высотой кремниевых брусков $h = 0.9$ мм

59.5 ГГц) дипольных резонансов. Этот факт подтверждается распределениями полей, которые представлены на рис. 6 для случая $h = 0.9$ мм.

Из рис. 6 видно формирование электрического диполя в кремниевом бруске на частоте 55.2 ГГц и магнитного диполя на частоте 59.5 ГГц. Коэффициент поглощения в случае возбуждения электрических дипольных резонансов (ED_1 или ED_2) значительно выше, чем в случае магнитных дипольных резонансов. Это объясняется более высокой напряженностью локального поля, а в случае с ED_1 резонансом еще и локализацией поля в центре кремниевого бруска (рис. 6), уровень потерь в котором выше, чем в кварцевой подложке.

Из простых физических соображений ясно, что частоты электрического и магнитного дипольных резонансов по-разному зависят от геометрических параметров брусков [6]. Для возбуждения магнитного резонанса необходима высота брусков, достаточная для того, чтобы электрическое поле на их верхней границе было сдвинуто по фазе на π относительно поля на нижней границе. Это приводит к существенной зависимости частоты магнитного резонанса от высоты брусков. Частота электрического дипольного резонанса практически полностью определяется поперечными размерами брусков. Это различие дает возможность менять положение резонансов на частотной оси в значительной мере независимо друг от друга, а также добиваться их перекрытия, изменяя геометрические параметры брусков. Мы приведем здесь результаты исследования резонансных свойств кремний-кварцевого метаслоя от высоты кремниевых брусков h .

На рис. 7 представлены частотные зависимости коэффициентов прохождения и поглощения кремний-кварцевого метаслоя для трех различных значений h . Видно, что с уменьшением h все резонансы смещаются в высокочастотную область, но значение сдвига для каждого резонанса различно. Так, для резонансов, связанных с подложкой (ED_2 и MD_2), значение сдвига резонансной частоты гораздо меньше, чем для резонансов, связанных с кремниевыми брусками. Кроме того, как показывают распределения полей, резонансы с изменением высоты брусков постепенно “меняют” свою природу. Так, при высоте брусков $h = 0.6$ мм максимум магнитно-

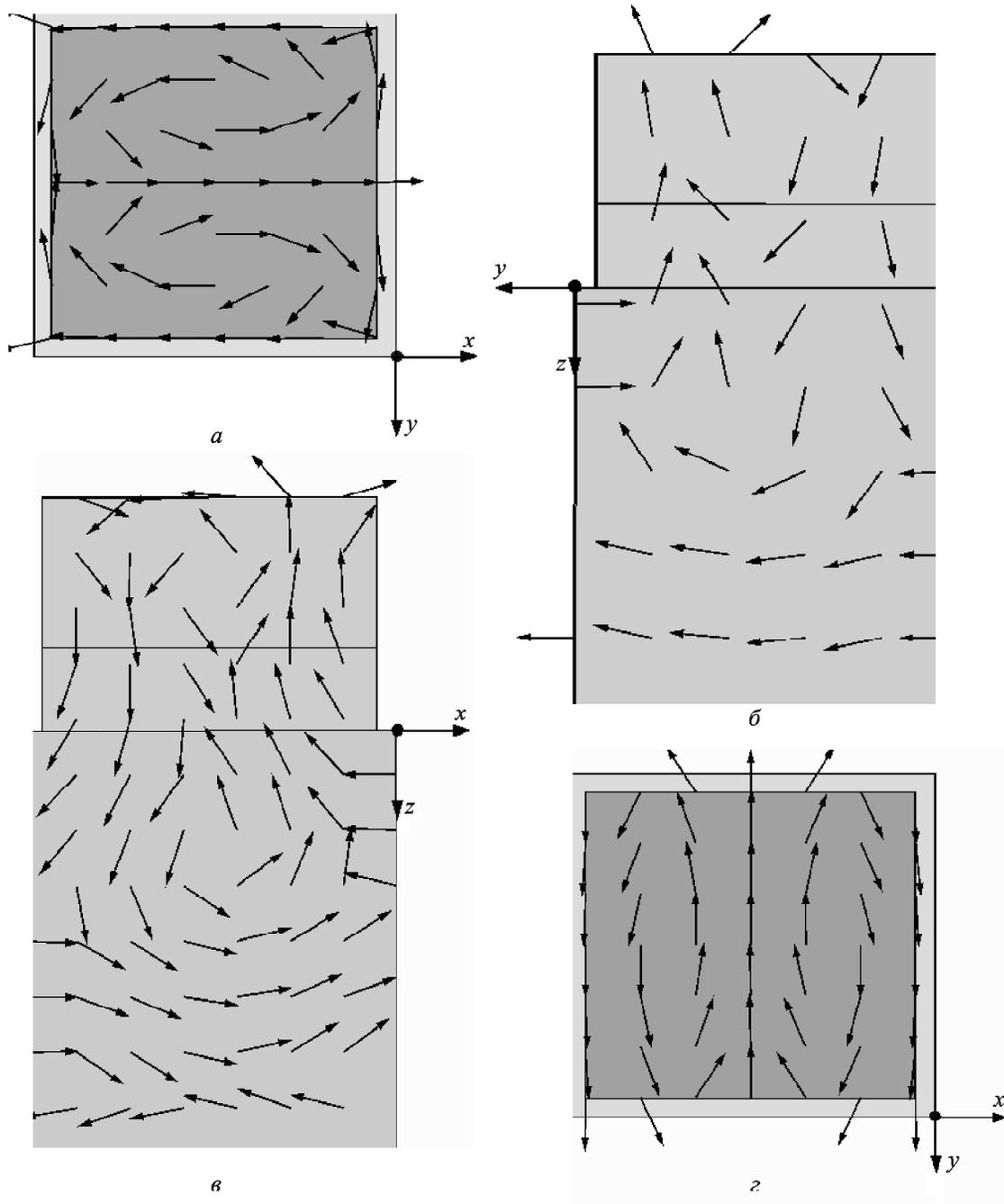


Рис. 6. Распределения электрических (а, в) и магнитных (б, г) полей в периодической ячейке кремний-кварцевого метаслоя на частотах резонансов ED_1 (а, б) и MD_1 (в, г), отмеченных на рис. 5

го поля резонанса MD_1 расположен в подложке, и в связи с этим данный резонанс должен быть соотнесен с резонансом в подложке, а не в кремниевом бруске, т. е. данный резонанс, по сути, становится резонансом MD_2 в принятой нами классификации. Сразу после этого значение сдвига данного резонанса в высокочастотную об-

ласть резко уменьшается (см. табл. 1), поскольку его свойства начинают определяться в большей степени свойствами подложки. Таким же образом при $h = 0.6$ мм электрический и магнитный резонансы в подложке меняются местами (см. табл. 1), после чего резонанс MD_2 выходит за пределы рабочей области, а резонанс MD_1 ,

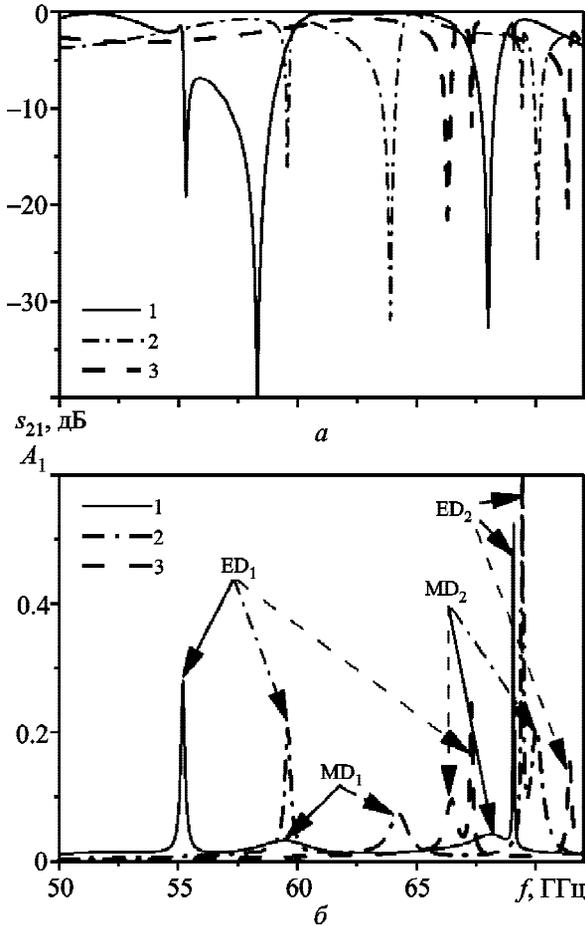


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициентов прохождения (а) и поглощения (б) кремний-кварцевого метаслоя с различной высотой кремниевых брусьев h : кривая 1 – $h = 0.9$ мм, кривая 2 – $h = 0.6$ мм, кривая 3 – $h = 0.3$ мм

Таблица 1. Зависимость резонансных частот и типов электрически и магнитных дипольных резонансов в кремний-кварцевом метаслое от высоты кремниевых брусьев

Высота брусьев, мм	Тип резонанса и частота, ГГц			
	ED ₁	MD ₁	MD ₂	ED ₂
0.9	55.2	59.5	68.1	69.08
0.8	56.42	61	68.2	69.25
0.7	57.87	62.7	68.85	69.33
0.6	59.6	64.25	70.05	69.44
		MD ₁ ↔ MD ₂	MD ₂ ↔ MD ₁	
0.5	61.88		65.37	69.63
0.4	64.5		66.05	70
0.3	67.31		66.5	71.425
	ED ₁ ↔ ED ₂			ED ₂ ↔ ED ₁
0.0			66.5	69.5

по сути, становится резонансом MD₂. Исследование полей на частоте самого низкочастотного резонанса (ED₁) для различных значений высоты кремниевого брусья показывает, что данный резонанс связан с формированием электрического диполя в брусье. Однако при условии $h = 0.3$ мм в распределении полей наряду с электрическим диполем в брусье появляется электрический диполь в подложке. Напряженность электрического поля в брусье больше, чем в подложке. Подобное распределение поля наблюдается и на частоте резонанса ED₂, но напряженность электрического поля в подложке больше, чем в брусье. Этим он и отличается от резонанса ED₁. Кроме того, при $h = 0.3$ мм резонансы ED₁ и MD₂ меняются местами на частотной оси. Дальнейшее уменьшение высоты кремниевого массива приводит к тому, что в рабочей зоне остаются только резонансы в подложке, положение которых на частотной оси незначительно отличается от положения этих резонансов для случая подложки в отсутствие кремниевого массива. Таким образом, при уменьшении высоты кремниевых брусьев распределения полей на частотах резонансов ED₁ и ED₂, MD₁ и MD₂ становятся подобными по форме и различаются только положением максимума напряженности поля. В этом случае соотноси данные резонансы с резонансами в брусьях или подложке можно чисто условно по месту положения максимумов распределения полей. Этот факт отображен в табл. 1 как переход резонансов в подложке в резонансы в брусьях, которые наблюдаются для магнитных дипольных резонансов при условии $h = 0.5$ мм, а для электрических дипольных резонансов – при условии $h = 0.3$ мм. Вблизи этих значений высоты брусьев соответствующие резонансы являются по своей сути “гибридными”.

Итак, в кремний-кварцевом метаслое на основе решетчатой подложки возможно формирование четырех добротных резонансов в рабочей зоне, которые могут быть четко соотносены с резонансами в кремниевых брусьях или в кварцевой подложке только в случае с высокими брусьями, $h > 0.6$ мм. В то же время в случае, когда потери в кремнии будут значительны (при наличии в кремнии примесей), использование “гибридных” резонансов в метаслое с $h \leq 0.6$ мм может быть предпочтительным

с точки зрения уменьшения потерь в кремнии за счет выдавливания поля в кварцевую подложку, где потери существенно ниже.

4. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

В результате использования технологии, кратко описанной в разделе 2, был получен образец диэлектрического метаслоя, фотография которого показана на рис. 1, в. Этот образец имеет размер 13×15 периодических ячеек. Измерения размеров решетчатой структуры с помощью микроскопа показали, что ширина и длина кремниевых брусьев выдержана с точностью $0.2 \div 0.4$ мм только в центральной части, которая содержит в себе 9×13 брусьев. При этом в направлении оси Ox наблюдается четкая периодичность значений l_x с периодом в два бруса, за исключением первого и последнего рядов брусьев. В пределах каждой из двух периодических групп значения l_x отличаются не более, чем на 0.1 мм. Значение l_x в первой периодической группе составляет $l_{x1} = (2.17 \pm 0.03)$ мм, а во второй – $l_{x2} = (2.46 \pm 0.05)$ мм. Размер l_y изменяется еще более сложным образом. В данном случае со 2-го по 9-й период наблюдается периодичность, как и в ортогональном направлении: $l_{y1} = (2.07 \pm 0.04)$ мм, а $l_{y2} = (2.35 \pm 0.03)$ мм. А с 10-го и по 14-й элемент $l_y = (2.22 \pm 0.05)$ мм. Отметим, что размеры крайних элементов в обоих направлениях значительно отличаются от используемых в расчетах. Таким образом, в образце существовало как минимум 6 различных групп брусьев, в рамках которых разброс размеров брусьев не превышал $2 \div 3$ %. Отличие в размерах брусьев между группами достигало $10 \div 15$ %. При этом в каждой группе насчитывалось $16 \div 20$ брусьев.

Естественно, что следствием наличия разброса размеров брусьев и периодичности их размещения, а также относительно небольшого числа брусьев с одинаковыми размерами является увеличение значения минимума коэффициента прохождения метаслоя в резонансе и уширение линий запираения, наблюдаемых в метаслое. Очевидно также, что различие в поперечных размерах брусьев наиболее существенным образом сказывается на электрических дипольных резонансах, свойства которых зависят от попе-

речных размеров брусьев в гораздо большей степени, чем от их высоты.

Кроме того, следует отметить, что в качестве материала для метаслоя был взят кремний с примесями, что привело к наличию в нем диссипативных потерь, существенно больших, чем в чистом высокоомном кремнии.

При разработке метода измерения коэффициента прохождения оказалось, что широко применяемый метод квазиоптического гаусовского пучка некорректен при исследовании созданного метаматериала. Это связано с неоднородным распределением амплитуды пучка, что приводит к неоднородному возбуждению соседних периодических ячеек метаслоя. Особенно это ощутимо в случае нарушения периодичности, так как снижается эффективность возбуждения и без того малого количества идентичных элементов. В идеале для исследования образца метаслоя необходима плоская волна, что достижимо в свободном пространстве или в компактном полигоне. В работе использован компромиссный вариант: метаслой возбуждается широким пучком, который значительно превышает размеры образца.

В экспериментальной установке был использован излучающий прямоугольный рупор с размерами 36×26 мм, который был размещен на расстоянии 600 мм от образца. В этом случае образец облучается сферической волной. Однако неоднородности амплитуды и фазы сферической волны в области образца незначительны, что достигается выбором размеров рупора и расстоянием до образца. В качестве источника излучения применялся аналоговый анализатор цепей типа P2-69. В экспериментальной установке использовались также квазиоптические приборы, разработанные ранее [8, 9]. Схема и фотография экспериментальной установки, предназначенной для измерения коэффициента прохождения метаматериалов, показаны на рис. 8.

Результаты измерений коэффициента прохождения метаслоя с высотой кремниевых брусьев $h = 0.9$ мм показаны на рис. 9. На представленной частотной зависимости коэффициента прохождения можно видеть только два резонанса запираения. Обсуждавшиеся выше результаты численного моделирования свойств метаслоя отличаются от результатов измерений и носят более сложный характер (см. рис. 5). С целью

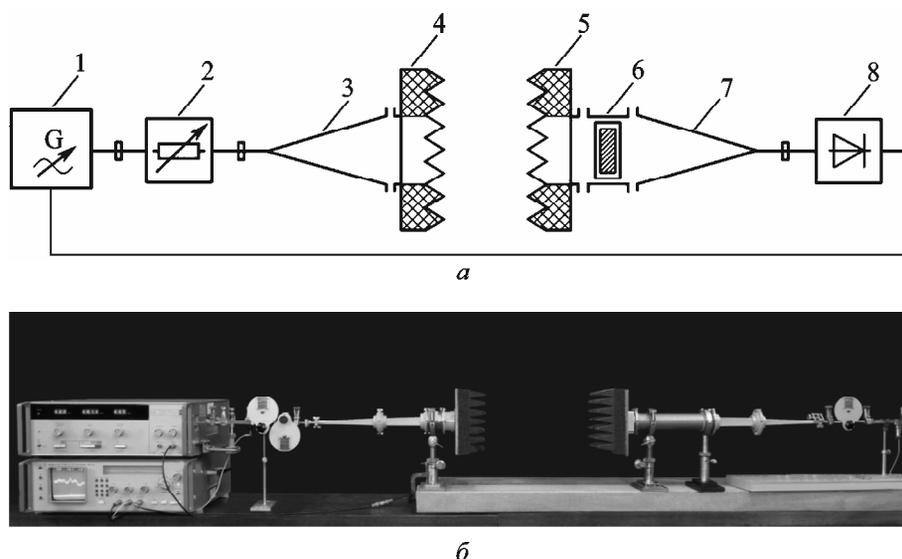


Рис. 8. Схема и фотография экспериментальной установки для измерения коэффициента прохождения: 1 – аналоговый анализатор цепей; 2 – аттенюатор; 3, 7 – прямоугольные рупоры; 4, 5 – поглотители; 6 – кассета с образцом метаматериала; 8 – детектор

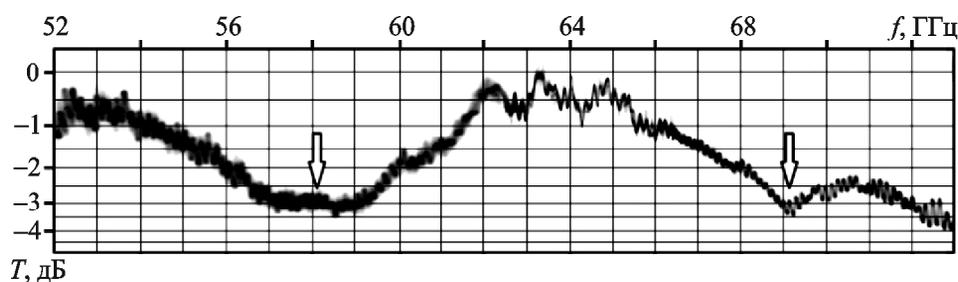


Рис. 9. Частотная зависимость коэффициента прохождения метаслоя с высотой кремниевых брусков $h = 0.9$ мм (максимальное значение условно принято равным 0 дБ)

выяснения причин отличия данных эксперимента от численных данных было проведено исследование влияния диссипативных потерь в кремнии на частотную зависимость коэффициента прохождения метаслоя. Расчеты показали, что при уровне потерь в кремнии, соответствующем $\text{tg}\delta = 0.05$, на частотных зависимостях коэффициента прохождения так же, как и в эксперименте, сохраняются всего два резонанса (см. рис. 10). Эти резонансы соответствуют магнитным дипольным резонансам (MD_1 и MD_2 на рис. 5). Электрические дипольные резонансы ED_1 и ED_2 оказываются ослабленными настолько, что их фактически невозможно идентифицировать по частотной зависимости коэффициента прохождения. Однако на частотных зависимостях коэффициентов поглощения наблю-

даются четыре максимума, которые соответствуют двум магнитным и двум электрическим резонансам в метаслое, как и для случая низких потерь (см. рис. 5).

Отметим, что в теории корректно учесть нарушение периодичности в метаслое не удастся, а поэтому полученная численная оценка для уровня потерь в кремниевом массиве реального образца ($\text{tg}\delta = 0.05$) завышена. Этот факт подтверждается также значительным уширением линий запираения магнитных резонансов в экспериментальных исследованиях. Как отмечалось ранее, реальный образец метаслоя содержит в себе 6 групп почти идентичных брусков, разброс линейных размеров которых 15%. Частоты резонансного запираения этих групп отличаются, что, по-видимому, приводит к ушире-

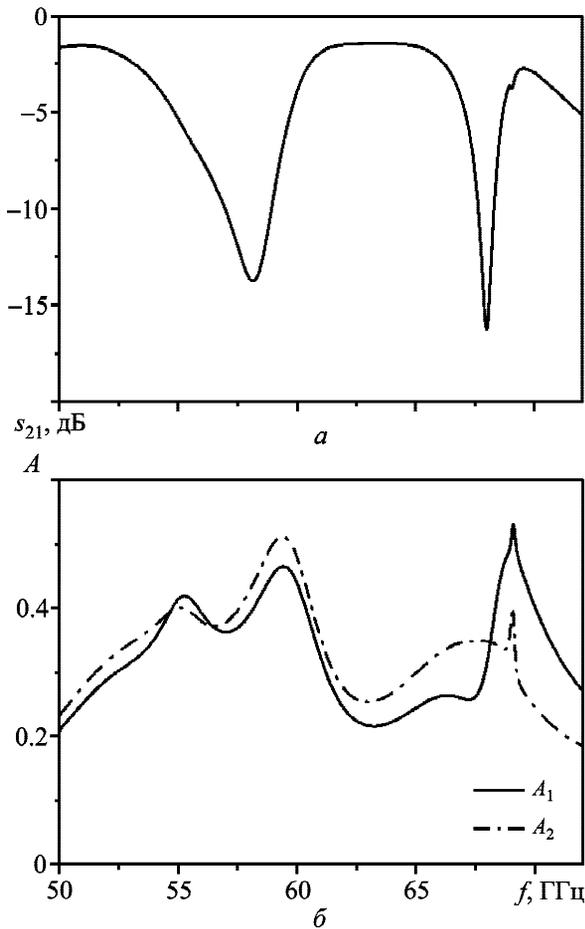


Рис. 10. Частотная зависимость коэффициентов прохождения и поглощения метаслоя с высотой кремниевых брусьев $h = 0.9$ мм для тангенса угла потерь кремния $\text{tg}\delta = 0.05$

нию резонансов. Кроме того, относительно малое количество брусьев в каждой группе (≤ 20) приводит к значительному увеличению значения минимума коэффициента прохождения в резонансе по сравнению с расчетным значением. Негативное влияние на измеряемую АЧХ метаслоя оказывают также крайние ряды брусьев, размеры которых существенно отличаются от используемых в расчете.

В табл. 2 приведены частоты резонансов запыриания метаслоя с различной высотой кремниевых брусьев. Резонансные частоты определены экспериментально и теоретически на основе численного моделирования прохождения плоской волны через метаслой при условии, что тангенс угла диэлектрических потерь кремния составляет 0.05. Видно хорошее соответствие измерен-

Таблица 2. Сравнение частот резонансов запыриания в метаслое, определенных экспериментально и вычисленных на основе математической модели

Высота кремниевых брусьев, мм	Частота резонансов запыриания, ГГц			
	Эксперимент		Численная модель	
	MD ₁	MD ₂	MD ₁	MD ₂
0.9	58.1	69.1	58.15	67.98
0.8	59.6	69.3	60.08	68.4
0.7	61.8	69.9	62.1	69.05
0.6	63.6	70	63.85	70.1

ных и теоретически предсказанных значений резонансных частот.

5. Выводы

Предложена новая модель технологичного полностью диэлектрического плоского метаматериала (метаслоя) на основе кремния, в котором могут возбуждаться резонансные колебания на магнитных и электрических дипольных модах. Коэффициенты отражения и прохождения метаслоя на соответствующих частотах имеют резко изменяющиеся асимметричные (характерные для резонансов Фано) частотные зависимости.

Особенностью предложенной конструкции метаматериала является сложная двухслойная структура его резонансных элементов. Кремниевые резонансные брусья находятся на подложке из двуокиси кремния, на поверхности которой по технологическим причинам нарезана периодическая решетка из брусьев таких же поперечных размеров. Впервые изучено влияние решетчатой подложки на свойства метаматериала.

Разработана технология алмазной резки для изготовления образца кремний-кварцевого метаматериала.

Экспериментальные исследования свойств метаматериала показали хорошее соответствие между положением на частотной шкале магнитных дипольных резонансов в массиве и в подложке с предсказанными посредством численного моделирования значениями. Отличия в значениях минимумов коэффициента прохождения на частотах резонансов в реальном образце и теоретических данных объясняется неточностями в выдерживании периодичности в образце, раз-

бросом размеров брусьев, который достигал 15 %, недостаточными для измерений резонансных характеристик размерами апертуры образца. С наличием дефектов периодической структуры и значительными диссипативными потерями в кремнии связано также исчезновение на частотных зависимостях коэффициента прохождения реального образца электрических дипольных резонансов.

Полученные результаты дают возможность прогнозировать, что использование чистого высокоомного кремния и усовершенствование технологии изготовления метаматериала откроют путь к получению нового типа полностью диэлектрических метаматериалов с резонансными характеристиками в терагерцовом диапазоне.

Авторы благодарят за финансовую поддержку Украинский научно-технологический центр и Национальную академию наук Украины (совместный проект 5958).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aydin K., Bulu I., Guven K., Kafesaki M., Soukoulis C. M., and Ozbay E. Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonator parameters and designs // *New J. Phys.* – 2005. – Vol. 7. – id. 168. DOI: 10.1088/1367-2630/7/1/168
2. Falcone F., Lopetegui T., Laso M. A. G., Baena J. D., Bonache J., Beruete M., Marqués R., Martín F., and Sorolla M. Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – Vol. 93, No. 19. – id. 197401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.197401
3. Khardikov V. V., Iarko E. O., and Prosvirnin S. L. A giant red shift and enhancement of the light confinement in a planar array of dielectric bars // *J. Opt.* – 2012. – Vol. 14, No. 3. – id. 035103. DOI: 10.1088/2040-8978/14/3/035103
4. Харди́ков В. В., Яр́ко Е. О., Про́сви́рнин С. Л. Использование матриц передачи и псевдоспектрального метода во временной области для исследования дифракции света на планарных периодических структурах // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 146–158.
5. Zhao Q., Zhou J., Zhang F., and Lippens D. Mie resonance-based dielectric metamaterials // *Materials Today.* – 2009. – Vol. 12, Is. 12. – P. 60–69. DOI: 10.1016/S1369-7021(09)70318-9
6. Van de Groep J. and Polman A. Designing dielectric resonators on substrates: Combining magnetic and electric resonances // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21, Is. 22. – P. 26285–26302. DOI: 10.1364/OE.21.026285
7. Lamb J. W. Miscellaneous data on materials for millimetre and submillimetre optics // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* vol. 17, no. 12, pp. 1997–2034. DOI:10.1007/BF02069487
8. Kuleshov, Y. M., 1986. Chapter 8. Measurements in sub-mm wavelength band. In: A. Y. USIKOV, ed. *Electronics and Radio Physics of Millimeter and Sub-millimeter Waves.* Kyiv: Naukova Dumka Publ., pp. 140–157 (in Russian).
9. The A.Y. Usikov Institute of Radio-Physics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, 2008. *Quasi-optical radio measuring devices on the basis of a circular hollow dielectric beamguide of submillimeters and millimeters waves* [online]. Available from: <http://www.ire.kharkov.ua/depquasi/HDB.html>

REFERENCES

1. AYDIN, K., BULU, I., GUVEN, K., KAFESAKI, M., SOUKOULIS, C. M. and OZBAY, E., 2005. Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonator parameters and designs. *New J. Phys.* vol. 7, id. 168. DOI: 10.1088/1367-2630/7/1/168
2. FALCONE, F., LOPETEGI, T., LASO, M. A. G., BAENA, J. D., BONACHE, J., BERUETE, M., MARQUÉS, R., MARTÍN, F. and SOROLLA, M., 2004. Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials. *Phys. Rev. Lett.* vol. 93, no. 19, id. 197401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.197401
3. KHARDIKOV, V.V., IARKO, E. O. and PROSVIRNIN, S. L., 2012. A giant red shift and enhancement of the light confinement in a planar array of dielectric bars. *J. Opt.* vol. 14, no. 3, id. 035103. DOI: 10.1088/2040-8978/14/3/035103
4. KHARDIKOV, V. V., IARKO, E. O. and PROSVIRNIN, S. L., 2008, Using of transmission matrixes and pseudospectral method in time domain to investigate light diffraction on planar periodic structures. *Radio physics and radio astronomy.* vol. 13, no. 2, pp. 146–158 (in Russian).
5. ZHAO, Q., ZHOU, J., ZHANG, F. and LIPPENS, D., 2009. Mie resonance-based dielectric metamaterials. *Materials Today.* vol. 12, is. 12, pp. 60–69. DOI: 10.1016/S1369-7021(09)70318-9
6. VAN DE GROEP, J. and POLMAN, A., 2013. Designing dielectric resonators on substrates: Combining magnetic and electric resonances. *Opt. Express.* vol. 21, is. 22, pp. 26285–26302. DOI: 10.1364/OE.21.026285
7. LAMB, J. W., 1996. Miscellaneous data on materials for millimeter and submillimetre optics. *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* vol. 17, no. 12, pp. 1997–2034. DOI:10.1007/BF02069487
8. KULESHOV, Y. M., 1986. Chapter 8. Measurements in sub-mm wavelength band. In: A. Y. USIKOV, ed. *Electronics and Radio Physics of Millimeter and Sub-millimeter Waves.* Kyiv: Naukova Dumka Publ., pp. 140–157 (in Russian).
9. The A.Y. Usikov Institute of Radio-Physics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, 2008. *Quasi-optical radio measuring devices on the basis of a circular hollow dielectric beamguide of submillimeters and millimeters waves* [online]. Available from: <http://www.ire.kharkov.ua/depquasi/HDB.html>

*V. V. Khardikov^{1,2}, S. L. Prosvirnin^{1,2}, V. I. Bezborodov³,
O. S. Kosyak³, Y. M. Kuleshov³, S. V. Mizrakhі³,
M. I. Nakhimovich³, P. K. Nesterov³,
and I. A. Nesterov³*

¹Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

²V. Karazin National University of Kharkiv,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

³O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

RESONANT PROPERTIES OF DIELECTRIC METALAYER

Subject and purpose: The resonant properties are studied of the dielectric metalayer in a form of a doubly periodic structure consisting of silicon parallelepipeds placed on a flat quartz substrate.

Design/methodology/approach: Using the pseudospectral time-domain method, numerical simulations of electromagnetic plane wave scattering on the metalayer are made. Resonant properties of the metalayer were experimentally investigated by measuring frequency characteristics of a transmitted electromagnetic wave in a quasi-optical measuring waveguide within 52 to 73 GHz. For experimental study, a sample of metalayer was made with the method of mechanical cutting of a layered silicon-quartz structure by a diamond disk. A peculiarity of the studied structure is a double-layer character of the array elements. Each element has a form of a parallelepiped and includes an upper silicon part and a bottom quartz part. A height of the upper part of parallelepiped was changed during the experimental study (the patterned silicon side of the metalayer was polished).

Findings: A new technological design of metalayers providing an excitation of high-Q resonances is proposed. The resonances were found to be associated with forming of longitudinal electric or magnetic dipoles in elements of the array and in the substrate. The properties of these kinds of resonances depend on the height of the elements in different ways that allows to control the resonant properties of the structure by selecting the height of the silicon parts. Experimental studies have confirmed the properties of the magnetic dipole resonances predicted theoretically.

Conclusions: Performed theoretical and experimental research efforts have demonstrated the opportunity to design all-dielectric resonant metalayers for terahertz applications.

Key words: dielectric metalayer, periodic structure, silicon, quartz, transmission resonance, absorption resonance

*B. B. Хардіков^{1,2}, С. Л. Просвірнін^{1,2}, В. І. Безбородов³,
О. С. Косьяк³, Є. М. Кулешов³, С. В. Мізрахі³,
М. І. Нахімович³, П. К. Нестеров³, І. А. Нестеров³*

¹Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

³Інститут радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України,
вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

РЕЗОНАНСНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО МЕТАШАРУ

Предмет і мета роботи: Досліджуються резонансні властивості діелектричного меташару у вигляді періодичної у двох перпендикулярних напрямках структури, що складається з кремнієвих прямокутних паралелепіпедів, розташованих на пласкій кварцовій підкладці.

Методи і методологія роботи: За допомогою псевдоспектрального метода у часовій області виконано числове моделювання взаємодії меташарів із електромагнітною хвилею. Експериментальне дослідження резонансних властивостей меташарів виконувалось у діапазоні 52 ÷ 73 ГГц на основі вимірювання частотних характеристик поля, що пройшло, у квазіоптичному вимірювальному тракті. Експериментальний зразок виготовлено методом механічної різки шаруватої кремній-кварцової структури алмазним диском. Особливістю досліджуваної структури є двошаровість елементів періодичного меташару. Кожен з елементів має форму прямокутного бруса і складається з верхнього кремнієвого паралелепіпеду і нижнього – кварцового. Висота верхньої частини брусів у процесі досліджень змінювалась (меташар зішліфовувався зі сторони кремнію).

Результати роботи: Запропоновано нову зручну у виготовленні конструкцію меташару, в якій можливе збудження декількох високодобротних резонансів. Резонанси пов'язані з формуванням у діелектричних елементах і підкладці розподілів полів, характерних для поздовжніх магнітного і діелектричного диполів. Властивості цих резонансів по-різному залежать від висоти брусів, що дозволяє керувати резонансними властивостями структури шляхом вибору висоти їх кремнієвої частини. Експериментальні дослідження підтвердили властивості резонансів магнітного типу, передбачені теоретично.

Висновок: Виконані теоретичні та експериментальні дослідження показали можливість створення повністю діелектричних резонансних меташарів для застосувань у терагерцово-му діапазоні.

Ключові слова: діелектричний меташар, періодична структура, кремній, кварц, резонанс проходження, резонанс поглинання

Статья поступила в редакцию 22.12.2015