

# ПРОПУСКАНИЕ МИКРОВОЛН МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРОЙ МЕТАМАТЕРИАЛ – ДИЭЛЕКТРИК: БЛИЖНЕЕ И ДАЛЬНЕЕ ПОЛЕ

И. А. Карпов

Институт Физики твёрдого тела РАН

142432 Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2018 г.

**Аннотация.** Представлены спектры пропускания в микроволновом диапазоне многослойной металл-диэлектрической структуры типа “невод” (“multi-fishnet”) с новым оригинальным дизайном метаматериального слоя как в ближнем, так и в дальнем полях; представлены картины микроволнового поля в окрестностях метаматериального образца. Сообщается о возникновении экстраординарного пропускания через данную структуру. Анализируется возможность объяснения наблюдаемого эффекта с точки зрения плазмонной теории и с точки зрения теории последовательности связанных резонаторов Фабри-Перо.

**Ключевые слова:** метаматериал, слоистые структуры, микроволны, спектр пропускания, поверхностные плазмоны, перфорированные металлические слои, резонаторы Фабри-Перо.

**Abstract.** In this paper a transmission of electromagnetic radiation through a multilayer metamaterial metal-dielectric structure (multi-fishnet) with new original design of rhombus-like subwavelength apertures in the near field as well as in the far field at microwave frequencies is considered. This multilayer stack consists of alternate periodically patterned metal foils and unperforated dielectric layers. The about eightfold enhancement of the microwave electric field strength behind the central part of the single subwavelength aperture in the form of a rhombus was observed in near field for all the studied foliated samples with the number of perforated aluminium layers from 2 to 12 at frequencies from 7 GHz to 20 GHz. This effect that first disclosed by Ebbesen within the optical range can be useful for both better understanding of the propagation behaviour of the electromagnetic waves and creation of various practical devices utilizing this effect. The number of peaks in the

transmission spectrums of the foliated metamaterial samples in the far field is equal to the number of dielectric spacers within a multilayer metamaterial structure. These dielectric spacers play a role of resonators providing the feature of the transmission spectrum similar to Fabry-Perot resonance. The resonant character of transmission for the investigated multilayer metamaterial stack is confirmed by the experimental microwave electric field patterns around the multilayer sample. The experimentally obtained results suppose the presence of a negative effective refractive index at the studied foliated metamaterial during its resonant pass band.

**Keywords:** metamaterial, multilayer structures, microwaves, transmission spectrum, surface plasmons, perforated metallic layers, Fabry-Perot cavities.

## Введение

В последние два десятилетия многие исследователи обращают своё внимание на многослойные структуры, изучая их необычные свойства. Также часто исследователи обращаются и к изучению поведения перфорированных металлических поверхностей и плёнок, называемых в англоязычной научной литературе «fishnet» – «невод». Такие перфорированные металлические поверхности, в большинстве случаев представляющие собой металлическую плёнку или фольгу с высверленным, вытравленным или созданным иным образом упорядоченным массивом чаще круглых или квадратных отверстий, поддерживают существование поверхностных плазмонов – электромагнитных поверхностных возбуждений, локализованных вблизи поверхности металла [1], что приводит при падении волны электромагнитного излучения на такую поверхность к возникновению сильных электрических полей вдоль этой поверхности, а также ведёт к прохождению падающего на такую модифицированную поверхность электромагнитного излучения через массив отверстий субволнового размера, как правило, в 4 – 10 раз меньшего, чем длина падающей электромагнитной волны [2].

В данной работе рассмотрено пропускание микроволн многослойной метаматериальной металл-диэлектрической структурой с новым оригинальным

дизайном ромбообразных отверстий в ближнем и дальнем поле. Спектр пропускания исследованной структуры демонстрирует увеличение пропускания микроволнового излучения позади одиночного отверстия этой структуры в ближнем поле: пропущенная через одиночное отверстие структуры микроволновая мощность оказывается в восемь раз больше, чем та, что падает прямо на площадь одиночного отверстия. Хотя эффект экстраординарного пропускания был открыт Эббесеном ещё в 1998 году, актуальность его изучения не утрачена до сих пор, потому что изучение увеличенного пропускания электромагнитных волн сквозь малые отверстия позволяет лучше понять природу распространения электромагнитных волн, в особенности их быстро убывающей нераспространяющейся компоненты, что может быть полезно как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. В дальнем поле спектр пропускания изученной многослойной структуры имеет важную особенность, свойственную спектрам пропускания многослойных структур типа “невод”, образованных чередованием металлических перфорированных слоёв и диэлектрических слоёв: число резонансных пиков в спектре пропускания таких структур равно числу диэлектрических прослоек  $N$ , содержащихся внутри структуры. Такая многопиковость спектра пропускания многослойной металл-диэлектрической структуры объясняется резонансами Фабри-Перо в её диэлектрических прослойках.

### **Слоистые структуры**

Слоистые структуры, образованные чередующимися слоями металла и диэлектрика, либо чередующимися слоями двух различных диэлектриков с сильно различающимися показателями преломления, обладают интересными оптическими свойствами [3]. В таких структурах наблюдается оптическое пропускание для некоторых длин волн света, в то время как другие длины волн испытывают практически полное отражение от этой слоистой структуры, образуя провалы в спектре её пропускания, называемые «фотонными запрещёнными зонами». Спектр пропускания таких слоистых структур демонстрирует поведение, подобное форме резонансов Фабри-Перо. При этом

коэффициент пропускания металл-диэлектрических слоистых структур в оптическом диапазоне может быть на несколько порядков больше, чем пропускание сквозь одиночный слой металлической плёнки с толщиной, равной суммарной толщине металлических плёнок, входящих в состав слоистой структуры [4]. Пропускание такой многослойной структуры может быть объяснено резонансным увеличением туннелирования электромагнитных волн через металлические стенки резонатора. Наведённая прозрачность подавляет эффективный коэффициент поглощения в металлических стенках резонатора, что вынуждает пересмотреть значение скин глубины в металлах, уходя от её номинального значения [4].

При этом в работе [5] подчёркивается, что указанный эффект увеличения пропускания многослойной металл-диэлектрической структуры и многопиковый характер её полосы пропускания проявляются даже при нормальном падении электромагнитной волны на структуру, когда эффект поверхностных плазмонов не может наблюдаться. Резонансное туннелирование, происходящее в области полосы пропускания многослойных металл-диэлектрических структур, достигается благодаря нераспространяющимся полям в металлических слоях, связанным с резонансом в диэлектрических прослойках. Такие нераспространяющиеся поля описываются действительной частью диэлектрической проницаемости металла [5], ответственной за потери. В работе [6] сообщается, что 256-периодная металл-диэлектрическая слоистая структура разработана так, что отражение от неё в узкой полосе частот, соответствующей фотонной запрещённой зоне, увеличивается до 98% в сравнении с 96%, которые обеспечивает чистая поверхность того же объёмного металла.

В работе [7] рассматривается три группы явлений: повышенное оптическое пропускание одиночного перфорированного металлического слоя, возникновение поверхностных электромагнитных мод (так называемых «обманных» – «spoof» или ложных поверхностных плазмонов) в периодически перфорированном металлическом слое, появление отрицательного показателя

преломления в перфорированной слоёной структуре металл-диэлектрик-металл – структуре двойного невода («double-fishnet»).

Как указали авторы [7], ссылаясь на работу [8], при прохождении электромагнитной волны через перфорированную металлическую плёнку возникают два пика пропускания, порождаемых возбуждением двух поверхностных резонансных электромагнитных мод, которые соответствуют комбинации двух противоположно направленных ложных поверхностных плазмонных поляритонов, возбуждаемых на двух противоположных поверхностях металлической плёнки. При введении диэлектрической прослойки между двух металлических перфорированных плёнок возникает новый резонансный пик в спектре пропускания структуры [7], расположенный при более длинных волнах электромагнитного излучения. При этом данные авторы указали на прямую связь между этим новым резонансным пиком пропускания и возникновением эффективного отрицательного показателя преломления в структуре “двойного невода”.

Указанные авторы [7] также отметили ещё одну важную особенность многослойных структур типа “невод”, образованных чередованием металлических перфорированных слоёв и диэлектрических слоёв: число резонансных пиков в спектре пропускания таких структур равно числу диэлектрических прослоек  $N$ . Авторы полагают, что эти  $N$  пиков пропускания соответствуют взаимодействию между ложными поверхностными плазмонными поляритонными модами, действующими в области диэлектрических прослоек и интерференционно связанными друг с другом сквозь двухмерный дырочный массив металлических слоёв. Кроме того, два пика экстраординарного оптического пропускания, соответствующих двум поверхностным электромагнитным модам от “входной” и “выходной” поверхностей многослойной металл-диэлектрической структуры типа “невод”, также присутствуют в её спектре пропускания. При этом ширина этих пиков сильно уменьшается с возрастанием числа диэлектрических прослоек  $N$  [7]; они практически сливаются в один пик, лежащий при меньшей длине волны, чем

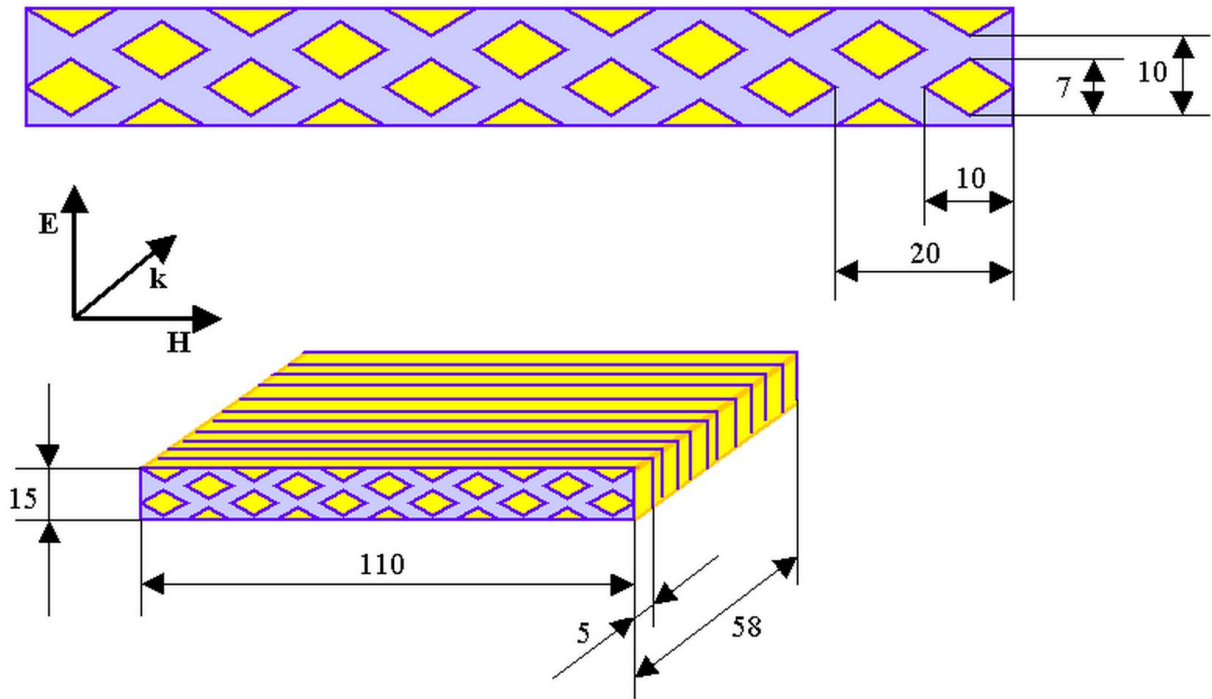
пики, обусловленные взаимодействием поверхностных плазмонных поляритонных мод из диэлектрических прослоек.

Кроме того, в работе [9] для многослойной структуры типа «невод», составленной из чередующихся перфорированных металлических слоёв и неперфорированных диэлектрических слоёв, как экспериментально, так и теоретически в микроволновом диапазоне были получены две серии пиков пропускания примерно равной интенсивности, по четыре пика в каждой серии, что было равно числу диэлектрических прослоек между металлическими перфорированными плёнками. В этой же работе для низкочастотной серии пиков теоретически было рассчитано, что при увеличении числа слоёв диэлектрика между слоями перфорированного металла с четырёх до десяти, число пиков пропускания в этой серии также должно увеличиться с четырёх до десяти.

Каждый такой перфорированный металлический слой метаматериала, как показано в работе [9], эквивалентен тонкому слою с чисто мнимым показателем преломления [10; 11] и имитирует в микроволновом диапазоне поведение плазмонных металлов (Au, Ag) в видимом диапазоне [1].

### **Дизайн образца**

По аналогии с работой [9] в настоящей работе была изготовлена многослойная структура типа «невод» с новым дизайном метаматериальных перфорированных металлических слоёв, чередующихся со слоями неперфорированного диэлектрика. Отверстия в металлической плёнке имели форму ромба с диагоналями 10 мм и 7 мм. Период структуры в направлении большей диагонали ромба составлял 20 мм, а в направлении малой диагонали – 10 мм. Толщина диэлектрических прослоек между слоями металла составляла 5 мм. Толщина металлической алюминиевой плёнки была взята 11 микрон. Число перфорированных металлических слоёв в структуре изменялось от 2 до 12. Внешний вид этой структуры, её метаматериального металлического слоя и их размеры показаны на рисунке 1.



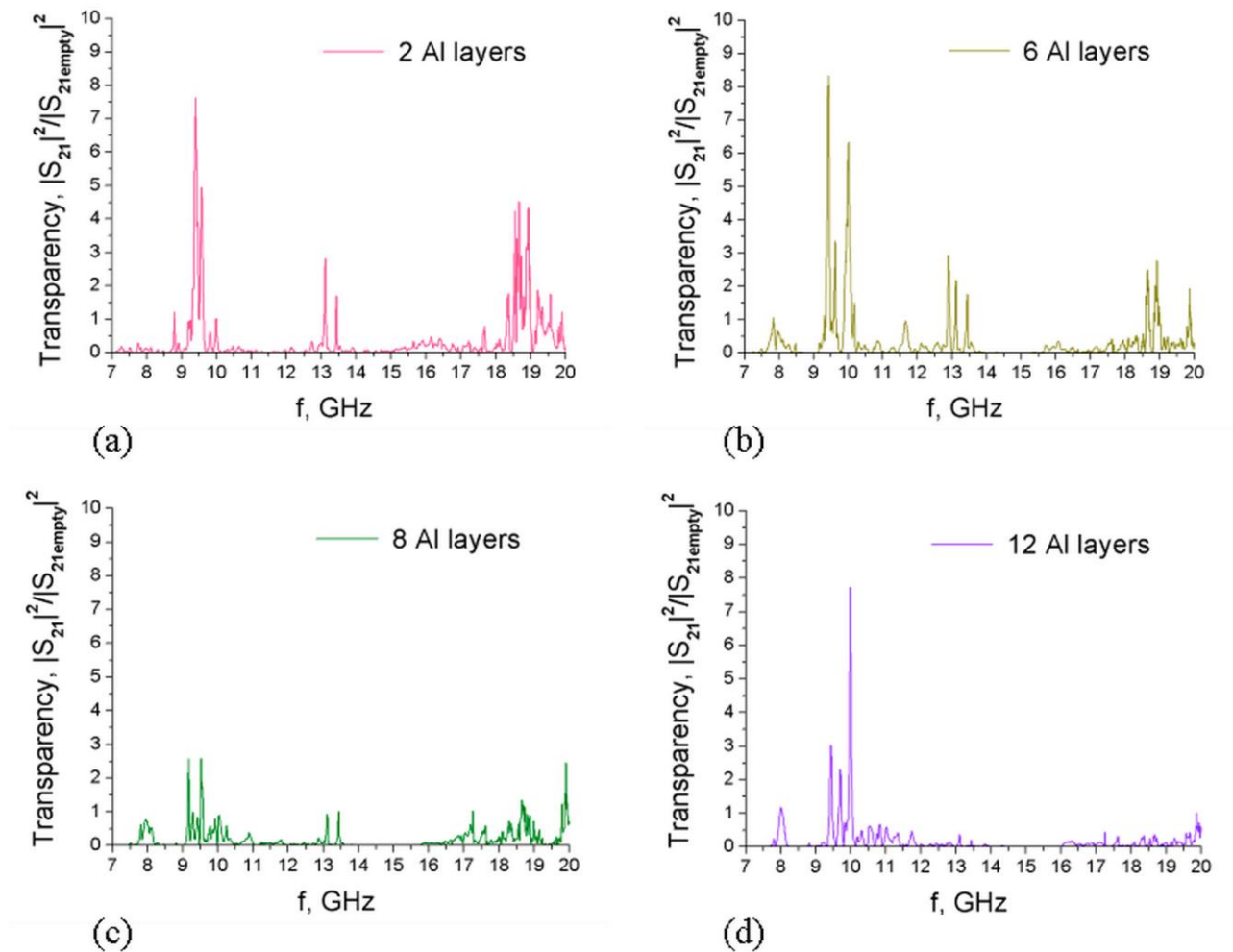
**Рис. 1.** Внешний вид образца и его метаматериального слоя; размеры даны в миллиметрах.

### Методика эксперимента

В настоящей работе микроволновое излучение падало на поверхность многослойной структуры типа “невод” нормально, как и у авторов [9], но излучение из плоского рупора направлялось в “плоский волновод” – зазор между двумя параллельными медными поверхностями, в котором располагался образец. При этом микроволновая электромагнитная волна была плоско поляризована с вертикальным направлением вектора электрического поля, перпендикулярного плоскостям параллельных медных поверхностей “плоского волновода”. Вторая, приёмная антенна представляла собой маленький медный стержень диаметром около 0,5 мм и высотой около 5 мм. Она располагалась с противоположной от излучателя стороны образца, точно вдоль малой диагонали (вертикально) ромбообразного отверстия, расположенного в центре структуры, на расстоянии 1 мм от задней поверхности образца – для проведения измерений в ближнем поле и на расстоянии 100 мм от задней поверхности образца – для проведения измерений в дальнем поле. Измерения

комплексных значений  $S_{21}$ -параметров проводились векторным анализатором цепей P4M-18 Томского НПФ “Микран”. Были измерены  $S_{21}$ -параметры многослойных структур типа “невод” с числом металлических слоёв 2, 4, 6, 8, 10 и 12.

Результаты измерений в ближнем поле для числа слоёв 2, 6, 8 и 12 приведены на рисунке 2, а результаты измерений в дальнем поле для числа слоёв 6, 8, 10 и 12 приведены на рисунке 3, как нормированные на пропускание пустого канала без образца.



**Рис. 2.** Экспериментально полученные в ближнем поле спектры пропускания многослойной структуры для числа перфорированных металлических слоёв 2, 6, 8 и 12 в диапазоне частот от 7 ГГц до 20 ГГц. Число слоёв в структуре указано на поле графика. Пропускание структуры нормировано на пропускание пустого измерительного канала без образца, как  $|S_{21}|^2/|S_{21,empty}|^2$ .



## Ближнее поле

Спектры пропускания исследованной многослойной “fishnet” структуры в ближнем поле (рисунок 2) имеют несколько полос пропускания: 8 ГГц – 10 ГГц; 13 ГГц – 14 ГГц и примерно 18 ГГц – 20 ГГц. Первая из этих полос пропускания наиболее интенсивная и содержит несколько пиков, превосходящих по величине единицу. Вторая полоса пропускания значительно слабее и почти исчезает в спектрах пропускания структур с большим числом перфорированных металлических слоёв (10 и 12). Наконец, третья полоса пропускания присутствует в спектрах пропускания всех изученных здесь структур, хотя величина её пиков значительно меньше, чем у первой полосы пропускания.

Наблюдаемые резонансные пики пропускания не могут быть объяснены поверхностными плазмонами [2], так как при нормальном падении электромагнитной волны на поверхность металла эффект поверхностных плазмонов не может наблюдаться [5], хотя эффект увеличения пропускания многослойной металл-диэлектрической структуры и многопиковый характер её полосы пропускания проявляются даже при нормальном падении электромагнитной волны на такую структуру [3]; [4]. Авторы [7] в своём теоретическом анализе многослойных структур типа “невод” комбинировали подходы увеличенного оптического пропускания [2] и возникновения “ложных” поверхностных плазмонов. Любопытно, что в работе [2] самый большой по интенсивности пик увеличенного оптического пропускания был получен при угле падения к нормали  $\theta = 0$ , то есть при нормальном падении, несмотря на то, что авторы объясняли увеличенное оптическое пропускание своей “неводной” структуры взаимодействием падающего света с поверхностными плазмонами, которые не могут наблюдаться при нормальном падении электромагнитной волны на поверхность, как указано в работе [5]. В работе [12] поверхностные волны магнитного потока были обнаружены при нормальном падении излучения на массив упорядоченных субволновых дырок при частоте экстраординарного пропускания. В работе [13] указывается на

отсутствие консенсуса относительно физических причин происхождения эффекта экстраординарного пропускания в последние два десятилетия.

Увеличенное пропускание электромагнитных волн сквозь “дырявую” структуру металл-диэлектрик-металл может быть также объяснено возникновением резонанса Фабри-Перо внутри диэлектрической прослойки между металлическими слоями [4] или возникновением последовательности связанных резонансов Фабри-Перо внутри многослойной металл-диэлектрической структуры [5].

В работе [2] было получено сильное увеличение интенсивности света, прошедшего сквозь массив упорядоченных отверстий в металлической оптически непрозрачной плёнке, что объяснялось взаимодействием света с поверхностными плазмонами, возникающими на металлической перфорированной поверхности. При этом абсолютная эффективность пропускания света сквозь субволновые отверстия превышала единицу (и даже две единицы), что объяснялось взаимодействием поверхностных плазмонов на передней и задней (в направлении распространения излучения) поверхностях «дырявой» металлической плёнки. Другими словами, проходящий сквозь одиночное субволновое отверстие свет был по интенсивности более чем в два раза больше, чем тот, что падает непосредственно на область этого отверстия. Позже это явление было названо экстраординарным оптическим пропусканием.

Для электромагнитных волн с длиной  $\lambda > a_0 \cdot \varepsilon^{1/2}$  не наблюдается дифракции ни от массива отверстий, ни от одиночного отверстия. Здесь  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды на выходе света из отверстия (позади металлической плёнки в направлении распространения света),  $a_0$  – период дырочного массива [2].

Как показано в работе [9], поверхностные плазмонные моды не могут играть какую-либо роль в пропускании электромагнитных волн сквозь перфорированную металл-диэлектрическую многослойную структуру при частотах, меньших частоты начала дифракции (когда  $\lambda = a_0$  при  $\varepsilon = 1$ ).

В настоящей работе период структуры  $a_0$ , ориентированный вдоль магнитного поля микроволн, равен  $a_h = 20$  мм, а период структуры  $a_0$ , ориентированный вдоль электрического поля микроволн, равен  $a_e = 10$  мм. Это соответствует частотам 15 ГГц и 30 ГГц. Следовательно, при частотах меньше 15 ГГц позади изученной перфорированной структуры не может происходить дифракция электромагнитных волн ни от массива отверстий, ни от одиночного отверстия, как было показано в работе [2]. И как показано в работе [9], в этом случае поверхностные плазмонные моды не могут играть какую-либо роль в пропускании электромагнитного излучения сквозь перфорированную металл-диэлектрическую многослойную структуру.

Однако увеличение пропускания микроволнового излучения сквозь одиночное отверстие перфорированной многослойной структуры возникает. Напряжённость микроволнового электрического поля позади одиночного отверстия перфорированной многослойной металл-диэлектрической структуры оказывается в несколько раз больше, чем в отсутствие многослойного метаматериального образца. Этот парадоксальный, на первый взгляд, странный факт объясняется просто: стержневая антенна, принимающая микроволны, была расположена точно вдоль малой диагонали ромбообразного одиночного отверстия, в ближнем поле, где напряжённость микроволнового электрического поля, проходящего сквозь это отверстие, была максимальной за счёт нераспространяющихся волн. Это увеличение микроволнового поля позади одиночного субволнового отверстия достигает восьми раз для исследованной в этой работе метаматериальной структуры. Восьмикратное увеличение прошедшей через субволновое отверстие интенсивности также было обнаружено Озбаем (Ozbay) в работе [14] для другой структуры.

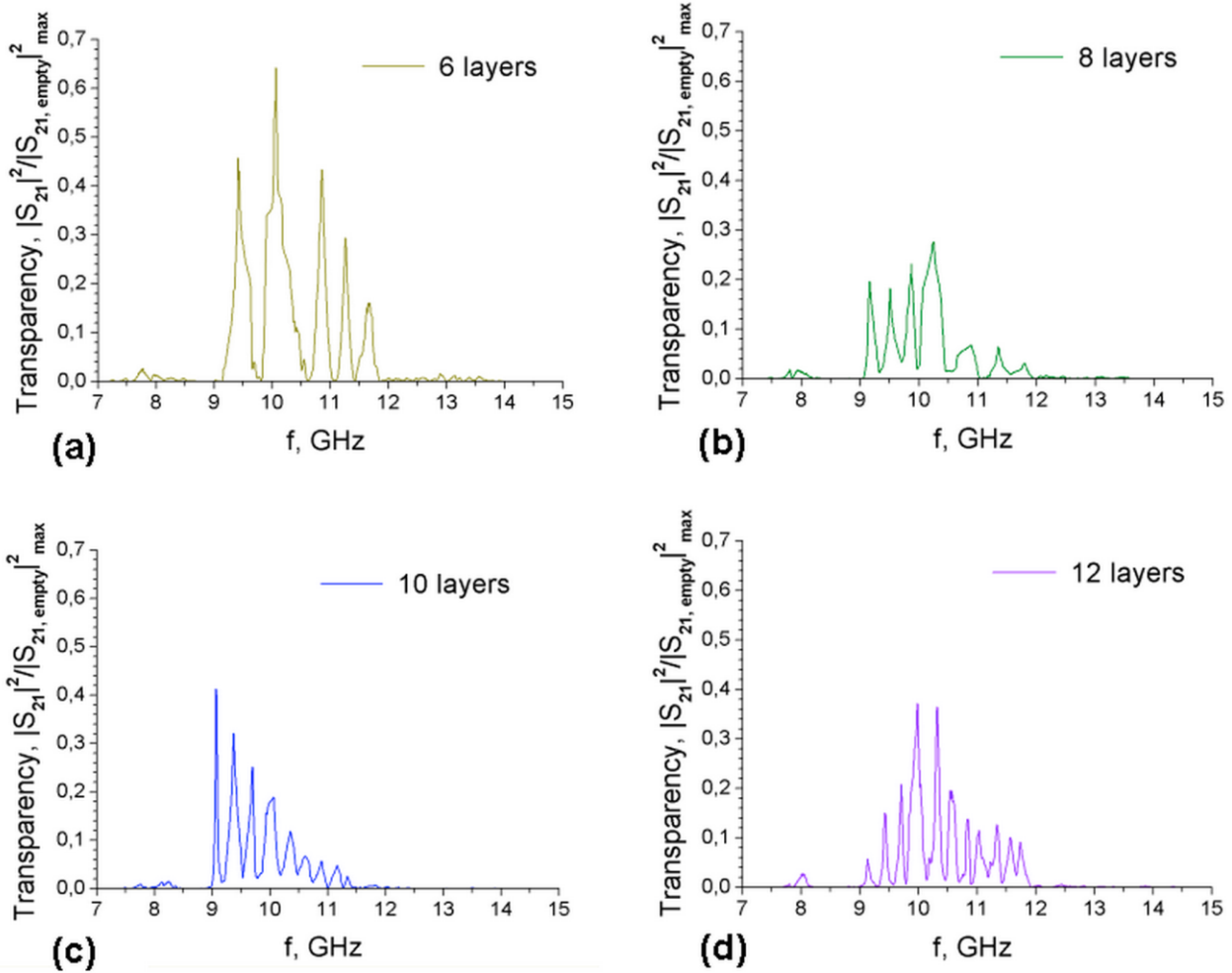
Удивительный эффект увеличенного пропускания сквозь малые отверстия был впервые описан в работе [2], где пропускание света сквозь субволновое отверстие превышало единицу (и даже две единицы). Излучение претерпевает пространственное перераспределение, проходя сквозь упорядоченный массив отверстий в металлической плёнке, что само по себе, вне всякого сомнения,

представляет собой удивительный эффект, открытый Эббесеном. Этот автор рассматривает такие структуры как активный элемент на пути падающей электромагнитной волны. Конечно, «дырявая» структура не усиливает электромагнитный сигнал, а только причиняет ему пространственное перераспределение. Однако, явление пропускания электромагнитного излучения сквозь субволновые отверстия, да ещё с фокусирующим эффектом для падающего на перфорированную структуру излучения, возникающим за счёт образующих её субволновых отверстий, является удивительным и притягательным для исследователей, так как оно может пролить свет на процессы, происходящие при распространении электромагнитных волн, в особенности, нераспространяющихся волн. Этот эффект может привести к серии полезных разработок в области приборов как микроволнового, так и оптического диапазонов.

### Дальнее поле

Спектры пропускания исследованной многослойной метаматериальной «fishnet» структуры в дальнем поле имеют две полосы пропускания (рисунок 3). Первая, более низкочастотная полоса, менее выражена, имеет малую интенсивность; пики пропускания едва различаются, их число меньше, чем число диэлектрических прослоек в многослойной структуре. Вторая, более высокочастотная полоса, гораздо интенсивнее, шире; пики пропускания отчётливо выражены, их число равно числу  $N$  диэлектрических прослоек в многослойной структуре.

Авторы [7] объясняют многопиковый характер пропускания многослойных перфорированных металл-диэлектрических структур как резонансами, возникающими в резонаторах Фабри-Перо (в направлении, нормальном к плоскости слоёв), так и взаимодействием двух противоположно распространяющихся в диэлектрических зазорах поверхностных плазмонных поляритонных мод (в направлении, параллельном плоскости слоёв). В работе [3] многопиковость спектра пропускания многослойной металл-диэлектрической структуры также объясняется резонансами Фабри-Перо.

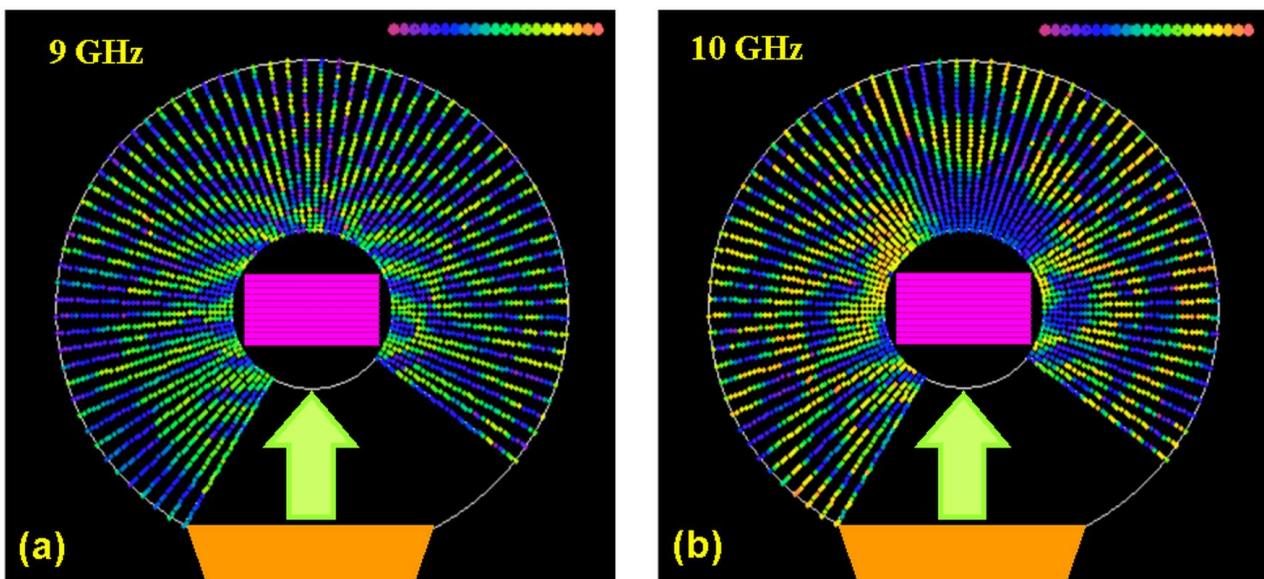


**Рис. 3.** Экспериментально полученные в дальнем поле спектры пропускания многослойной структуры для числа перфорированных металлических слоёв 6, 8, 10 и 12 в диапазоне частот от 7 ГГц до 15 ГГц. Число слоёв в структуре указано на поле графика. Пропускание структуры нормировано на пропускание пустого измерительного канала без образца, как  $|S_{21}|^2/|S_{21,empty}|^2_{max}$ .

Не обращая внимания на эту путаницу, авторы [9] отмечают, что получили при нормальном падении микроволн на свою многослойную структуру типа “невод” отклики пропускания, похожие на результаты теоретической работы [7]. При этом авторы [9] указывают, что высокочастотный пик полосы пропускания их структуры соответствует условиям резонанса Фабри-Перо для каждого отдельного резонатора Фабри-Перо, образуемого всякой диэлектрической прослойкой, входящей в состав многослойной структуры, что согласуется с работой [5]. Низкочастотный пик полосы пропускания их

структуры соответствует условиям резонанса Фабри-Перо для всей многослойной структуры целиком. При этом авторы [9] показывают, что порядковый номер пика резонансной моды (в направлении от меньшей частоты к большей) в полосе пропускания многослойной структуры совпадает с числом соответствующих данному резонансу пропускания стоячих волн электрического поля внутри этой структуры.

На полученных при помощи установки визуализации микроволновых полей “Polar 1”, описанной в работе [15], картинах электрической составляющей микроволнового поля (рисунок 4) при частотах 10 ГГц и 11 ГГц при нормальном падении микроволнового излучения на поверхность структуры, содержащей 12 перфорированных металлических слоёв, хорошо заметно возмущение микроволнового поля, вызванное резонансом.



**Рис. 4.** Картины микроволнового электрического поля при нормальном падении излучения на образец для частоты 9 ГГц (до начала резонанса – слева) и 10 ГГц (при резонансе – справа). Схематически на рисунках показан излучатель – трапеция и образец – прямоугольник. Направление падающего микроволнового излучения показано стрелкой. На правом рисунке отчетливо видны возмущения волновой картины, вызванные резонансом. На левом рисунке возмущений нет.

Так как для всякого упорядоченного массива отверстий в идеальном проводнике плазменная частота  $\omega_p$  заменяется частотой отсечки “волноводной моды” [1] (“дырочного волновода”), то для структуры “двойного невода” длина волны отсечки  $\lambda_c = 2d_h$ , где  $d_h$  – геометрический размер отверстия в металлической плёнке в направлении магнитной составляющей  $\mathbf{H}$  электромагнитной волны, падающей на структуру [7]. Следовательно, можно получить величину  $\lambda_c = 9,7$  мм для работы [9] и  $\lambda_c = 20$  мм для настоящей работы. Указанные длины волн соответствуют частотам  $f_c = 30,9$  ГГц для работы [9] и  $f_c = 15$  ГГц для настоящей работы.

Как было показано в теоретической работе [7], ниже частоты отсечки “дырочного волновода” (“дырочной” частоты отсечки) действительная часть комплексной эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\text{eff}}$  для двойной структуры “невод” (и для многослойных структур “невод” – тоже) принимает отрицательное значение. Проход через ноль при смене знака действительной части эффективной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{eff}}$  при её скачке, соответствующем возникающему в структуре резонансу, происходит при частотах резонансных пиков пропускания, вызванных появлением диэлектрических прослоек между металлическими перфорированными слоями. Таким образом,  $\mu_{\text{eff}}$  принимает при частотах резонансных пиков пропускания как положительные, так и отрицательные значения.

Как отмечают авторы работы [7], именно поверхностная плазмонная поляритонная мода “ложных” поверхностных плазмонов, распространяющихся в диэлектрическом зазоре, ответственна за резонансный магнитный отклик многослойной металл-диэлектрической структуры. Поэтому нет ничего удивительного в том, что спектральное положение резонансной полосы пропускания, обусловленной диэлектрическими слоями между перфорированными металлическими слоями структуры, совпадает по частоте с магнитными откликами структуры. А при одновременно отрицательных значениях действительной части  $\epsilon_{\text{eff}}$  (ниже “дырочной” частоты отсечки  $f_c$ ) и действительной части  $\mu_{\text{eff}}$  (при частотах “диэлектрической” резонансной

полосы пропускания) действительная часть эффективного показателя преломления  $n_{\text{eff}}$  также принимает отрицательные значения. Следовательно, если “диэлектрическая” полоса резонансного пропускания многослойной перфорированной металл-диэлектрической структуры лежит при частотах, меньших “дырочной” частоты отсечки  $f_c$ , то при частотах этой “диэлектрической” полосы резонансного пропускания должно наблюдаться отрицательное преломление.

Так как в данной работе обе полосы пропускания лежат ниже 12 ГГц, а “дырочная” частота отсечки  $f_c = 15$  ГГц, то в диапазоне частот “диэлектрической” резонансной полосы пропускания от 9 ГГц до 12 ГГц должно наблюдаться отрицательное преломление слоистого метаматериала.

## **Выводы**

Таким образом, в данной работе была исследована в микроволновом диапазоне частот от 7 ГГц до 20 ГГц многослойная металл-диэлектрическая структура типа “невод” (“fishnet”), состоящая из чередующихся слоёв диэлектрика и перфорированной алюминиевой фольги, в которой были вырезаны ромбовидные отверстия субволнового размера. В указанном диапазоне частот в ближнем и дальнем поле были получены спектры пропускания многослойной структуры с числом алюминиевых перфорированных слоёв от 2 до 12. Число пиков в спектре пропускания таких структур в дальнем поле было равно числу  $N$  диэлектрических прослоек-резонаторов, обеспечивающих структуре линейчатый спектр пропускания, свойственный резонансу Фабри-Перо, что может быть использовано в перспективе для создания узкополосных частотных фильтров.

В указанном выше диапазоне частот были получены картины электрической составляющей микроволнового поля вокруг многослойной металл-диэлектрической метаматериальной «fishnet» структуры при различной её ориентации по отношению к падающему на неё микроволновому излучению. На картинах поля при частотах 10 ГГц и 11 ГГц отчётливо видны резонансные возмущения микроволн. Так как резонансное поведение структуры возникало



ниже “дырочной” частоты отсечки, то можно говорить об отрицательном эффективном показателе преломления для данного метаматериала в этой резонансной полосе.

Увеличение пропускания микроволнового излучения сквозь одиночное субволновое отверстие в металлической фольге наблюдалось в ближнем поле для всех изученных слоистых образцов с числом перфорированных алюминиевых слоёв от 2 до 12 при частотах от 7 ГГц до 20 ГГц. Было получено восьмикратное увеличение напряжённости микроволнового электрического поля позади центральной части одиночного отверстия многослойной метаматериальной “fishnet” структуры. Открытый Эббесеном в оптическом диапазоне эффект может быть полезен как для лучшего понимания природы распространения электромагнитного излучения, так и для создания различных практических приборов, использующих этот эффект.

### Литература

1. J. B. Pendry, L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal. Mimicking surface plasmons with structured surfaces. // *Science*. 2004. Vol. 305 (5685), p. 847 – 848. DOI: 10.1126/science.1098999.
2. T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio & P. A. Wolff. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. // *Nature*. 1998. Vol. 391, p. 667 – 669.
3. M. C. Larciprete, C. Sibilia, S. Paoloni, M. Bertolotti, F. Sarto, and M. Scalora. Accessing the optical limiting properties of metallo-dielectric photonic band gap structures. // *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 93, No. 9, p. 5013 – 5017. DOI: 10.1063/1.1564283.
4. M. Scalora, M. J. Bloemer, A. S. Pethel, J. P. Dowling, C. M. Bowden, and A. S. Manka. Transparent, metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structures. // *Journal of Applied Physics*. 1998. Vol. 83, No. 5, p. 2377 – 2383. DOI: 10.1063/1.366996.

5. M. R. Gadsdon, J. Parsons, and J. R. Sambles. Electromagnetic resonances of a multilayer metal-dielectric stack. // *Journal of Optical Society of America B*. 2009. Vol. 26, No. 4, p. 734 – 742.
6. A. J. Ward, J. B. Pendry, and W. J. Stewart. Photonic dispersion surfaces. // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 1995. Vol. 7, No. 10, p. 2217 – 2224.
7. A. Mary, Sergio G. Rodrigo, L. Martin-Moreno and F. J. Garcia-Vidal. Plasmonic metamaterials based on holey metallic films. // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2008. Vol. 20, p. 304215-1 – 304215-8. DOI: 10.1088/0953-8984/20/30/304215.
8. L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal, H. J. Lezec, K. M. Pellerin, T. Thio, J. B. Pendry and T. W. Ebbesen. Theory of Extraordinary Optical Transmission through Subwavelength Hole Arrays. // *Physical Review Letters*. 2001. Vol. 86, p. 1114.
9. Celia A. M. Butler, James Parsons, J. Roy Sambles, Alastair P. Hibbins, and Peter A. Hobson. Microwave transmissivity of a metamaterial-dielectric stack. // *Applied Physics Letters*. 2009. Vol. 95, p. 174101-1 – 174101-3. DOI: 10.1063/1.3253703.
10. R. Sauleau, Ph. Coquet, J. P. Daniel, T. Matsui, and N. Hirose. Study of Fabry-Pérot cavities with metal mesh mirrors using equivalent circuit models. Comparison with experimental results in the 60 GHz band. // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1998. Vol. 19, No. 12, p. 1693 – 1710.
11. J. Bae, J.-C. Chiao, K. Mizuno, and D. B. Rutledge. Metal mesh couplers using evanescent waves at millimeter and submillimeter wavelengths. // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1995. Vol. 16, No. 2, p. 377.
12. M. Camacho, R. R. Boix, and F. Medina. Computationally efficient analysis of extraordinary optical transmission through infinite and truncated subwavelength hole arrays. // *Physical Review E*. 2016. Vol. 93, p. 063312-1 – 063312-15. DOI: 10.1103/PhysRevE.93.063312

13. P. R. Ulibarri. Metamaterials and extraordinary transmission structures applied to microwave, millimeter and terahertz waves devices. // Thesis of Doctor of Philosophy. The Public University of Navarra, Spain. 2017. p. 18 – 23.
14. H. Hajian, E. Ozbay, H. Caglayan. Beaming and enhanced transmission through a subwavelength aperture via epsilon-near-zero media. // Nature, Scientific Reports. 2017. No. 7, p. 4741-1 – 4741-8. <http://www.nature.com/scientificreports> DOI: 10.1038/s41598-017-04680-y
15. И. А. Карпов, Э. Д. Шу. Метаматериальное “магнитное” покрытие при микроволновых частотах. // Журнал Радиоэлектроники: электронный журнал. 2014. N4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/9/text.html> .

**Для цитирования:**

И. А. Карпов. Пропускание микроволн многослойной структурой метаматериал–диэлектрик: ближнее и дальнее поле. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec18/19/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2018.12.19