

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.6>

УДК: 537.876

ПЛАЗМОННАЯ ПРИРОДА СТОЯЧИХ МИКРОВОЛН В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ, ПОЗАДИ «ДЫРЯВЫХ» МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

И.А. Карпов

Институт Физики твердого тела РАН
142432, Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2

Статья поступила в редакцию 22 июня 2022 г.

Аннотация. В данной работе изучены картины микроволновых электрических полей позади многослойных метаматериальных структур типа “Невод” и многослойных одномерных массивов отверстий в ближней зоне, в непосредственной близости от перфорированной поверхности образцов. Обнаружено, что микроволновые картины ближнего поля при некоторых частотах демонстрируют узоры амплитуды электрического поля, соответствующие возникновению стоячих волн в непосредственной близости от перфорированной поверхности. Делается предположение, что такие стоячие волны могут являться следствием интерференции различных плазмонных мод, возникающих как на перфорированных поверхностях металлических пластин, так и в диэлектрических зазорах между ними.

Ключевые слова: метаматериал, структура типа “Невод”, перфорированные металлические пластины, отверстия, диэлектрические зазоры, многослойные структуры, картины микроволнового электрического поля, ближнее поле, поверхностные плазмоны, пародирующие поверхностные плазмоны.

Автор для переписки: Карпов Игорь Анатольевич, karpow@issp.ac.ru

Введение

В последние годы многие исследователи посвящают свои работы изучению свойств метаматериалов, изготовленных на основе Fishnet-структур, или структур типа “Невод”, если говорить по-русски. Исследовались свойства как однослойных структур такого типа [1, 2], так и двухслойных (Double Fishnet) [2, 3], и многослойных (Multifishnet) [2, 4]. Однако, в многочисленных работах, сообщающих о результатах исследований в этом направлении, не удается найти картины ближнего поля в непосредственной близости от поверхности метаматериальных структур типа Невода, проливающие свет на механизм распространения электромагнитных волн сквозь эти заслуживающие внимания многочисленные исследователей структуры. Данная статья направлена на восполнение этого пробела в научных исследованиях.

1. Немного теории

В 2004 году Пендри (Pendry) с соавторами [5, 6] продемонстрировал, что связанные поверхностные плазмоноподобные волны могут быть поддерживаемы даже на идеально проводящих подложках так долго, как только эти подложки имеют периодические неоднородности на своей поверхности. Перфорированный металл с отверстиями субволнового размера поддерживает сильно локализованные поверхностные плазмоноподобные волны. Это происходит, потому что дырки могут позволять некоторому количеству поля проникать внутрь подложки, что изменяет ситуацию согласования полей на поверхности. Дырки в металле действуют как волноводы и, следовательно, имеют частоту отсечки, ниже которой нет распространения мод. Таким образом, ниже частоты отсечки только быстро исчезающие нераспространяющиеся поля существуют на металлической стороне границы раздела, и это точно та полевая характеристика, что требуется для поверхностной моды. Пендри (Pendry) и сотрудники показали: если размер и период поверхностного массива дырок много меньше, чем длина волны, то электромагнитный отклик поверхности может быть описан

диэлектрической функцией эффективной среды в форме Друде с эффективной плазменной частотой, продиктованной чисто дизайном геометрии поверхности. Частота отсечки мод в волноводах эквивалентна эффективной поверхностной плазменной частоте структурированной поверхности.

Области сильнейшего электрического поля расположены в непосредственной близости от металлической поверхности, и петли линий поля сильно напоминают поля поверхностных плазмонов на поверхности металлов. Эти поля демонстрируют экспоненциальное убывание напряженности электрического поля при удалении от поверхности. При этом поток мощности сильно увеличивается непосредственно над поверхностью [7].

Хотя свободная поверхность неперфорированного проводника не имеет поверхностных мод, дырки создают “пародирующие” поверхностные плазмоны, которые играют равную резонансную роль, как это делают реальные плазмоны на серебре. Дисперсионное отношение этих поверхностных электромагнитных мод управляемо Друде-подобным поведением, в котором плазменная частота электронного газа заменяется частотой отсечки дырочного волновода [5, 6]. Присущие их подражающим свойствам по отношению к поверхностным плазмон-поляритонам (SPPs), эти наведенные геометрией поверхности электромагнитные моды были названы подражающими поверхностными плазмон-поляритонами (spoof SPPs).

Щелевая поверхностная плазмон-поляритонная (gap-SPP) мода, бегущая в диэлектрическом слое, размещенном между двух металлических пленок [8], называется “пародирующей” щелевой поверхностной плазмон-поляритонной (spoof gap-SPP-like) модой. Ее происхождение не берет начало от конечной диэлектрической константы металла, как в случае реальных щелевых поверхностных плазмон-поляритонных (gap-SPP) мод, но оно зависит от существования двумерного дырочного массива, высверленного на пленках идеальных электрических проводников.

Между пародирующими щелевыми поверхностными плазмон-поляритонными (spoof gap-SPP-like) модами, бегущими в областях диэлектрических зазоров, существует электромагнитное взаимодействие. Эти локализованные моды электромагнитно связаны посредством двумерных дырочных массивов слоев идеальных электрических проводников.

Резонансный магнитный отклик, что приводит к отрицательным значениям магнитной проницаемости, свойственен возбуждению пародирующих щелевых поверхностных плазмонных поляритоноподобных (spoof gap-SPP-like) мод, распространяющихся вдоль диэлектрического зазора. С другой стороны, электрический отклик, главным образом, контролируется частотой отсечки дырочного волновода, которая маркирует разделение между положительными и отрицательными значениями эффективной диэлектрической проницаемости.

Узоры амплитуды электрического поля имеют характер стоячих волн и происходят от интерференции между двумя противоположно распространяющимися пародирующими щелевыми поверхностными плазмонными поляритоноподобными (spoof gap-SPP-like) модами [2].

2. Методика эксперимента

В данной работе исследовались ближние электрические микроволновые поля в диапазоне от 7 ГГц до 20 ГГц в непосредственной близости от поверхности структуры метаматериального Невода. Исследования проводились с помощью оригинального визуализатора электрических микроволновых полей “POLAR1”, на который был получен Патент РФ. Данный визуализатор полей включает в свой состав векторный анализатор цепей P4M-18 Томской Научно-Производственной Фирмы “Микран”, кабельные сборки той же Фирмы, оригинальный плоский рупор-излучатель, оригинальную дискообразную измерительную камеру типа “плоский волновод” (Flat waveguide), оригинальную зондирующую антенну, изготовленную из кабельной сборки Фирмы “Микран”, а также механизмы прецизионных перемещений. Детально принцип работы

установки “POLAR1” и ее устройство описаны в работах [9, 10].

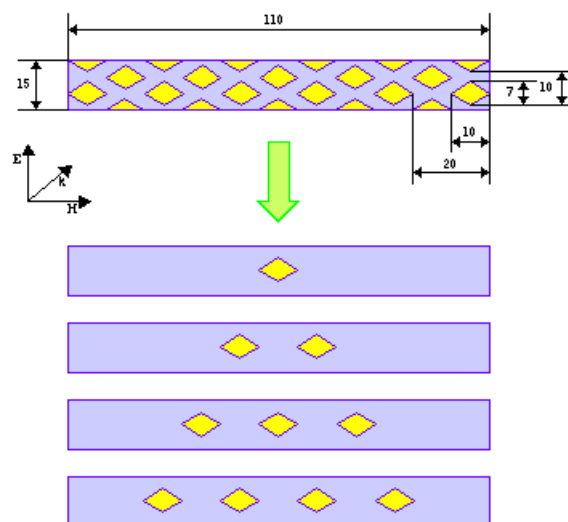


Рис. 1. В верхней части рисунка показан чертеж одного из слоев многослойной структуры типа “Невод” (Fishnet – Multifishnet), представляющего собой тонкую пластину из алюминиевой фольги толщиной 11 микрон. Ниже, по зеленой стрелке, изображены пластины из такой же алюминиевой фольги, но с одним, двумя, тремя и четырьмя отверстиями в виде ромбов, расположенными по средней линии пластины. Размеры отверстий и шаг (период) структуры, а также размеры самих пластин – одинаковы для всех пластин, изображенных на рисунке, и указаны в его верхней части.

В качестве метаматериальной структуры типа “Невод” исследовалась многослойная структура с отверстиями в форме ромба, изучавшаяся ранее в работе [11], а также исследовались новые структуры, представляющие собой тонкие слои алюминия с отверстиями той же формы и того же размера, но число отверстий в пластине изменялось от одного до четырех. Отверстия располагались в один ряд, точно по средней линии пластины, а шаг данной одномерной структуры был такой же, как и в ранее изучавшейся структуре, подробно описанной в работе [11]. На рисунке 1 схематически представлены пластины, применявшиеся для сборки слоистых метаматериальных структур, изучавшихся в данной работе. Все размеры указаны в миллиметрах.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

При экспериментальном исследовании ближнего поля микроволнового излучения, прошедшего через многослойный метаматериальный образец, содержащий двенадцать алюминиевых слоев с отверстиями в виде ромбов, который описан в работе [11], на частоте 8 ГГц были получены амплитудные картины электрического поля, имеющие отчетливо выраженный характер стоячих волн (Рисунок 2(e)). При уменьшении числа слоев в изучаемой метаматериальной слоистой “Неводной” структуре с 12 до 6, а затем – до 4 и до 2 слоев полевой узор, соответствующий стоячим волнам, сохранялся на изображениях картин амплитуд микроволновых электрических полей. Однако, когда слоев в структуре оставалось только два, узор становился очень нечетким, едва заметным (рисунок 2(b)).

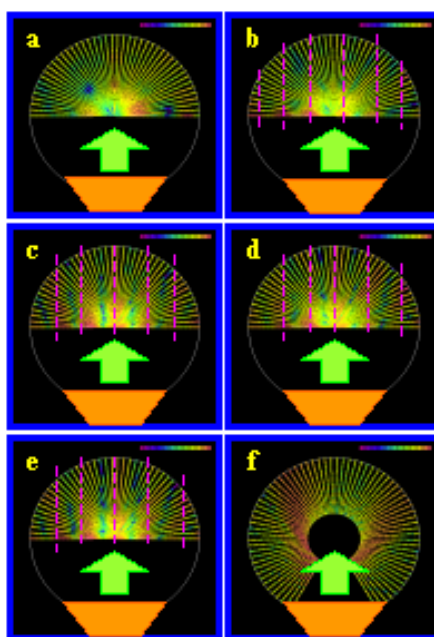


Рис. 2. Амплитудные картины ближнего микроволнового электрического поля позади структуры “Невод”: (a) – для одного слоя “Невода”, (b) – для двух слоев, (c) – для четырех слоев, (d) – для шести слоев, (e) – для двенадцати слоев. Розовые пунктирные линии указывают на расположение пучностей стоячих волн, образующихся позади исследуемых структур. Случай (f) представляет для сравнения картину дальнего поля для двенадцати слоев структуры. Диаметр цветной полевой картины для ближнего поля – 120 мм, для дальнего поля: 500 мм – наружный диаметр и 140 мм – внутренний. Все изображения на данном рисунке получены на частоте 8 ГГц.

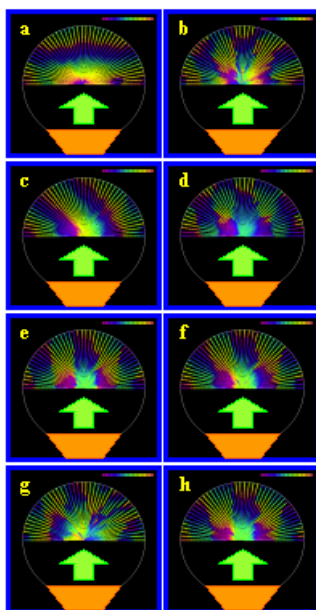


Рис. 3. Фазовые картины ближнего микроволнового электрического поля: (a) – для одного слоя “Невода” на частоте 8 ГГц, (b) – на частоте 9 ГГц; (c) – для двух слоев “Невода” на частоте 8 ГГц, (d) – на частоте 9 ГГц; (e) – для четырех слоев “Невода” на частоте 8 ГГц; (f) – для шести слоев “Невода” на частоте 8 ГГц, (g) – на частоте 9 ГГц; (h) – для двенадцати слоев “Невода” на частоте 8 ГГц. Диаметр цветной полевой картины – 120 мм. Хорошо видно, что в случае (a) возмущения поля отсутствуют; в случае (c) возмущения поля незначительны. В остальных случаях фазовые картины микроволнового электрического поля имеют вид более или менее выраженной “шахматной доски”.

Фазовая картина микроволнового электрического поля для этого случая показана на рисунке 3(c). Здесь можно видеть незначительные возмущения картины микроволнового поля. При этом амплитудный узор оказывался несколько более четким на частоте 9 ГГц, хотя и там он был достаточно размыт. Фазовая картина электрического поля для этого случая представлена на рисунке 3(d) и демонстрирует возмущение полевого узора, напоминающее шахматную доску. Когда на пути микроволнового излучения оставался только один слой данной структуры, то на частоте 8 ГГц картина стоячих волн в амплитудном поле отсутствовала полностью (рисунок 2(a)), в то время как на частоте 9 ГГц она была едва заметна. Фазовые картины микроволнового поля для этих двух случаев показаны на рисунках 3(a) и 3(b), соответственно. Первая из них иллюстрирует отсутствие возмущения полевого узора, а вторая – несколько размытый “шахматный” узор.

Эти наблюдения позволяют сделать вывод о том, что в слоистых метаматериальных структурах типа “Невод” в ближнем поле, в непосредственной близости от “дырявой” поверхности структуры, возникают стоячие волны, “бегущие” вдоль ее поверхности. Эти волны, как отмечалось выше, порождаются интерференцией двух противоположно распространяющихся пародирующих щелевых поверхностных плазмонных поляритоноподобных (spoof gap-SPP-like) мод, бегущих в диэлектрическом зазоре между пластинами многослойной метаматериальной структуры типа “Невод”.

Если посмотреть на картины амплитуды дальнего электрического поля, где расстояние от поверхности структуры до места зондирования составляет порядка двух длин волн и более, то стоячих волн позади данной многослойной структуры на них не наблюдается. Это отчетливо видно на рисунке 2(f).

Здесь уместно возникает вопрос: как изменится амплитудный узор микроволнового электрического поля, если на пути микроволн устанавливать пластины, по размерам аналогичные тем, из которых была собрана исследованная структура, но с меньшим числом точно таких же дырок? С целью нахождения ответа на этот вопрос были изготовлены алюминиевые пластины равного размера, как в описанной выше структуре, но с одним, двумя, тремя и четырьмя отверстиями, расположенными по средней линии пластин. Форма и размер отверстий были те же, что и в уже исследованной структуре; для пластин с несколькими отверстиями – шаг одномерного массива отверстий был равен периоду структуры, изученной ранее.

Амплитудные картины микроволнового электрического поля двухслойных структур с двумя, тремя и четырьмя отверстиями в форме ромбов демонстрировали на частоте 8 ГГц ярко выраженный узор, свойственный стоячим волнам, “бегущим” вдоль “дырявой” поверхности образца (Рисунок 4: (d), (f) и (h)). Длина этих стоячих волн была около четырех сантиметров. Этот узор был практически такой же, как и у ранее изученной структуры “Невода”. Однако, амплитудная картина микроволнового электрического поля

двухслойной структуры со всего лишь одним отверстием в форме ромба в каждой пластине, хотя и давала похожий полевой узор на частоте 8 ГГц, но этот узор был менее четким (Рисунок 4(b)). При этом “шаг” этого узора, то есть длина стоячей полуволны, несколько увеличился, в сравнении с длиной полуволны, наблюдавшейся для двухслойных структур с двумя, тремя и четырьмя отверстиями, а также в сравнении с изученной ранее многослойной структурой типа “Невод” с числом слоев 12, 6, 4 и 2. Здесь следует добавить, что отверстия в пластинах располагались точно напротив друг друга. Также здесь следует вспомнить, что амплитудный узор двухслойной структуры типа “Невод” был на частоте 8 ГГц очень нечетким, почти незаметным (Рисунок 2(b)), но был гораздо лучше виден на частоте 9 ГГц, хотя и на этой частоте он был весьма плохого качества. Фазовые картины микроволнового электрического поля, как отмечалось выше, были изображены для этих последних двух случаев на рисунках 3(c) и 3(d), соответственно. При этом первый из них демонстрировал незначительное возмущение полевого узора, а второй – узор “шахматной доски”.

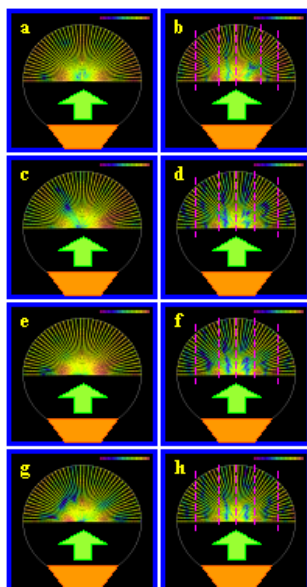


Рис. 4. Амплитудные картины ближнего микроволнового электрического поля позади пластин с отверстиями в виде ромба для однослойных структур: (а) – для пластины с одним отверстием, (с) – с двумя отверстиями, (е) – с тремя отверстиями, (g) – с четырьмя отверстиями; для двухслойных структур: (b) – для двух пластин с одним отверстием в каждой пластине, (d) – с двумя отверстиями, (f) – с тремя отверстиями; (h) – с четырьмя отверстиями. В случае двухслойных структур отверстия в пластинах располагались точно напротив друг друга. Розовые пунктирные линии указывают расположение пучностей стоячих волн позади исследуемых структур. Диаметр цветной полевой картины – 120 мм. Все изображения на данном рисунке получены на частоте 8 ГГц.

Фазовые картины микроволнового электрического поля двухслойных структур с одним, двумя, тремя и четырьмя отверстиями в форме ромбов показывали на частоте 8 ГГц отчетливую картину “шахматной доски” (Рисунок 5: (b), (d), (f) и (h)).

Стоит подробнее остановиться на случае, когда на пути микроволнового излучения оставалась только одна пластина с ромбическими отверстиями. В этом случае одиночная пластина со структурой ромбических отверстий “Невод” показывала полное отсутствие узора стоячих волн на частоте 8 ГГц на амплитудных картинах микроволнового электрического поля (Рисунок 2(a)). Фазовая картина поля для этого случая не выявляла возмущений полевого узора (Рисунок 3(a)).

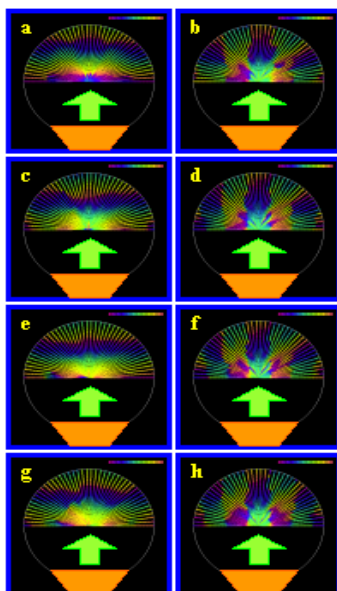


Рис. 5. Фазовые картины ближнего микроволнового электрического поля позади пластин с отверстиями в виде ромба для однослойных структур: (а) – с одним отверстием, (с) – с двумя отверстиями, (е) – с тремя отверстиями, (г) – с четырьмя отверстиями; для двухслойных структур: (b) – с одним отверстием, (d) – с двумя отверстиями, (f) – с тремя отверстиями, (h) – с четырьмя отверстиями. В двухслойных структурах отверстия в пластинах располагались точно напротив друг друга. Диаметр цветной полевой картины – 120 мм. Все изображения на данном рисунке получены на частоте 8 ГГц. Хорошо видно, что в случаях однослойных структур возмущения поля отсутствуют. Для двухслойных структур фазовые картины имеют вид “шахматной доски”.

На частоте 9 ГГц едва заметный узор, соответствующий стоячим волнам, на амплитудной картине все же просматривался. Фазовая картина поля для этого случая отображала слегка размытый узор “шахматной доски” (Рисунок 3(b)).

Одиночные пластины с четырьмя, тремя и двумя отверстиями не давали картины стоячих волн, “бегущих” вдоль их поверхности, на частоте 8 ГГц (Рисунок 4: (g), (e) и (c)), но давали очень размытую картину, едва похожую на узор стоячих волн, на частоте 9 ГГц. Среди этих картин самой четкой оказалась картина, даваемая пластиной с двумя отверстиями; пластина с тремя отверстиями давала более размытую картину; пластина с четырьмя отверстиями давала настолько размытую картину, что разглядеть в ней хотя бы какой-то намек на упорядоченный узор, соответствующий стоячим волнам, было просто невозможно.

Фазовые картины микроволнового электрического поля одиночных пластин с четырьмя, тремя и двумя отверстиями в форме ромбов не выявляли возмущения полевого узора на частоте 8 ГГц (Рисунок 5: (g), (e) и (c)).

Одиночная пластина с одиночным отверстием в форме ромба никакой картины стоячих волн не давала ни на частоте 8 ГГц (Рисунок 4(a)), ни на частоте 9 ГГц, ни на какой-либо другой частоте в диапазоне от 7 ГГц до 20 ГГц. Это подтверждается также отсутствием соответствующих возмущений на фазовой картине микроволнового электрического поля для этой одиночной пластины (Рисунок 5(a)).

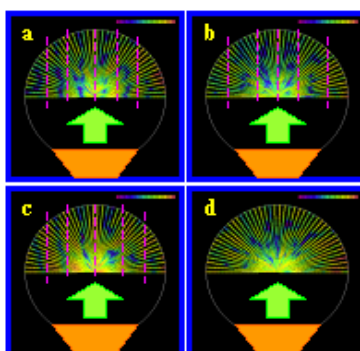


Рис. 6. Амплитудные картины ближнего микроволнового электрического поля позади четырехслойных структур из пластин с разным числом отверстий в виде ромбов. Для структуры с возрастающим числом отверстий в пластинах от одного до четырех (1-2-3-4): (a) – на частоте 8 ГГц, (b) – на частоте 9 ГГц. Для структуры с убывающим числом отверстий в пластинах от четырех до одного (4-3-2-1): (c) – на частоте 8 ГГц, (d) – на частоте 9 ГГц. Розовые пунктирные линии указывают расположение пучностей стоячих волн позади исследуемых структур. Диаметр цветной полевой картины – 120 мм. Хорошо видно, что в случае (d) стоячие волны не наблюдаются.

Наконец, были изучены картины микроволновых электрических полей позади четырехслойных метаматериальных структур, содержащих пластины с различным числом отверстий в виде ромбов. Четырехслойная структура, в которой число отверстий в пластинах нарастало от одного отверстия – в первой пластине до четырех отверстий – в последней пластине (1-2-3-4), давала на амплитудной картине микроволнового электрического поля четкий узор, соответствующий стоячим волнам, “бегущим” вдоль “дырявой” поверхности структуры, на частоте 8 ГГц (Рисунок 6(a)). На частоте 9 ГГц узор стоячих волн становился более размытым (Рисунок 6(b)). Четырехслойная структура, в

которой число отверстий в пластинах убывало от четырех отверстий – в первой пластине до одного отверстия – в последней пластине (4-3-2-1), давала на амплитудной картине микроволнового электрического поля более размытый узор, соответствующий стоячим волнам, “бегущим” вдоль “дырявой” поверхности структуры, на частоте 8 ГГц (Рисунок 6(c)). На частоте 9 ГГц узор стоячих волн в этом случае не наблюдался (Рисунок 6(d)).

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что стоячие волны, “бегущие” вдоль “дырявой” поверхности структуры, порождаются интерференцией двух противоположно распространяющихся пародирующих щелевых поверхностных плазмонных поляритоноподобных (spoof gap-SPP-like) мод, бегущих в диэлектрическом зазоре между пластинами, когда этих “дырявых” пластин две или более. При этом число упорядоченных отверстий в пластинах не влияет значительно на качество получающегося амплитудного узора микроволнового электрического поля позади этих пластин. Когда отверстие в пластинах остается только одно, то амплитудный узор становится менее четким, а его “шаг” несколько увеличивается. Если в многослойной структуре содержатся пластины с различным числом отверстий, то амплитудный узор позади такой структуры становится менее качественным, когда пластина с одним отверстием располагается на выходе многослойной структуры, и почти не реагирует на наличие в структуре пластины всего с одним отверстием, когда она находится на входе многослойной структуры.

Что касается случая одиночных пластин с ромбическими отверстиями, то понятно, что никакие противоположно распространяющиеся пародирующие щелевые поверхностные плазмонные поляритоноподобные (spoof gap-SPP-like) моды, бегущие в диэлектрическом зазоре между пластинами, в этом случае появиться не могут. Здесь возможно лишь появление интерференции, возникающей в результате взаимодействия противоположно распространяющихся пародирующих поверхностных плазмонных поляритоноподобных (spoof SPP-like) мод, бегущих по противоположным поверхностям металлической перфорированной пластины и

взаимодействующих друг с другом через отверстия, вырезанные в этой металлической пластине. В этом случае амплитудные узоры микроволнового поля, соответствующие стоячим волнам, “бегущим” вдоль “дырявой” поверхности пластины, становятся менее четкими и наблюдаются при более высокой частоте (9 ГГц вместо 8 ГГц). При этом одиночная пластина со структурой “Невод” дает более геометрически правильный, хотя и менее отчетливо видимый узор, нежели одиночные пластины с четырьмя, тремя и двумя отверстиями в виде ромбов, расположенными вдоль осей этих одиночных пластин. Последние дают весьма искаженные амплитудные узоры, хотя и более отчетливо выделяющиеся на фоне амплитудной картины микроволнового электрического поля. Одиночная пластина с всего лишь одним отверстием в виде ромба, расположенным точно в ее центре, амплитудного узора стоячих волн не дает ни при какой частоте, что подтверждается также фазовыми картинами микроволнового электрического поля позади этой пластины. Очевидно, что всего лишь одного отверстия в пластине оказывается недостаточно для возбуждения противоположно распространяющихся пародирующих поверхностных плазмонных поляритоноподобных (spoof SPP-like) мод, бегущих по поверхностям этой пластины.

Заключение

В ходе проведенных исследований были получены экспериментальные картины ближнего микроволнового электрического поля позади слоистых метаматериальных структур типа “Невод” при различном числе слоев в структуре и слоистых структур с одномерными массивами аналогичных отверстий при различном числе слоев и с различным числом отверстий в этих слоях.

Узоры амплитуды электрического поля выявляют наличие стоячих волн в ближнем поле, непосредственно у поверхности этих структур. Эти узоры подтверждают высказывавшееся в работах других авторов [2] мнение о том, что вблизи поверхности многослойных перфорированных метаматериальных

структур должны возникать стоячие волны, происходящие от интерференции между двумя противоположно распространяющимися пародирующими щелевыми поверхностными плазмонными поляритоноподобными (spoof gap-SPP-like) модами, бегущими в диэлектрических зазорах структуры.

Исследование однослойных метаматериальных структур типа “Невод” и однослойных одномерных массивов отверстий, аналогичных отверстиям в структуре типа “Невод”, показало, что позади этих образцов, в непосредственной близости от их поверхности, также возникают амплитудные узоры электрического поля, соответствующие образованию стоячих микроволн в ближнем поле. Такие амплитудные узоры можно объяснить интерференцией между двумя противоположно распространяющимися пародирующими поверхностными плазмонными поляритоноподобными (spoof SPP-like) модами, возникающими на противоположных поверхностях металлической перфорированной пластины и взаимодействующими между собой через отверстия в ней. Эти узоры проявляются не очень четко и с уменьшением числа отверстий в пластине становятся хаотичными, мало похожими на четкую периодическую структуру амплитудного узора стоячих волн. Когда в пластине остается только одно отверстие, то никакого амплитудного узора, соответствующего стоячим волнам, не наблюдается.

Литература

1. Ebbesen T.W., Lezec H.J., Ghaemi H.F., Thio T., Wolff P.A. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. *Nature*. 1998. V.391. P.667-669.
2. Mary A., Rodrigo Sergio G., Martin-Moreno L., Garcia-Vidal F.J. Plasmonic metamaterials based on holey metallic films. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2008. V.20. P.304215. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/30/304215>

3. Hajian Hodjat, Ozbay Ekmel, Caglayan Humeyra Beaming and enhanced transmission through a subwavelength aperture via epsilon-near-zero media. *Nature, Scientific Reports*. 2017. V.7. P.4741. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04680-y>
4. Butler Celia A.M., Parsons James, Sambles J. Roy, Hibbins Alastair P., Hobson Peter A. Microwave transmissivity of a metamaterial–dielectric stack. *Applied Physics Letters*. 2009. V.95. P.174101. <https://doi.org/10.1063/1.3253703>
5. Pendry J.B., Martín-Moreno L., García-Vidal F.J. Mimicking Surface Plasmons with Structured Surfaces. *Science*. 2004. V.305. P.847-848.
6. Garcia-Vidal F.J., Martin-Moreno L., Pendry J.B. Surfaces with holes in them: new plasmonic metamaterials. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2005. V.7. P.97-101. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/7/2/013>
7. Hibbins Alastair P., Lockyear Matthew J., Sambles J. Roy Surface Plasmons on Metamaterials. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers)*. 2008. V.6987. Article 698712. <https://doi.org/10.1117/12.780247>
8. Economou E.N. Surface Plasmons in Thin Films. *Physical Review*. 1969. V.182. №2. P.539-554.
9. Karpov I.A., Shoo E.D. New equipment for microwave electric field visualization. *Review of Scientific Instruments*. 2012. V.83. P.074704. <https://doi.org/10.1063/1.4737495>
10. Карпов И.А., Шу Э.Д. Метаматериальное “магнитное” покрытие на СВЧ-частотах. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2014. №4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/9/text.html>
11. Карпов И.А. Пропускание микроволн многослойной структурой метаматериал–диэлектрик: ближнее и дальнее поле. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2018. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.12.19>

Для цитирования:

Карпов И.А. Плазмонная природа стоячих микроволн в ближнем поле, позади «дырявых» металлических пластин. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.6>