

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.1>

УДК: 537.868.4; 537.876.4

РЕЗОНАТОРНАЯ ЯЧЕЙКА С ОТКРЫТЫМ ВХОДОМ НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

А.М. Лебедев ¹, М.Л. Обухов ²

**¹ Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13**

**² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский
университет), 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., д.9**

Статья поступила в редакцию 11 января 2022 г.

Аннотация. Возможность перевода энергии падающей электромагнитной волны в энергию поверхностной волны в плоской диэлектрической пластине на металлической подложке подтверждена на электродинамических моделях. Для передачи энергии между волнами разной структуры используется дифракционная решетка, помещаемая на поверхность пластины. Энергия удерживается в пластине путем образования резонатора поверхностной волны за счет введения не выступающих металлических стенок по торцам пластины. Таким образом, предложена резонаторная ячейка с открытым входом – энергия поступает в ячейку через всю освещенную поверхность пластины. Полагается, что диэлектрик, из которого выполнена пластина, имеет малые потери, а дифракционная решетка на поверхности пластины состоит из одинаковых брусков из того же диэлектрика, имеющих малое поперечное сечение. Показано, что при определенном периоде решетки имеет место резонанс – резкое увеличение амплитуды стоячей волны внутри пластины, по сравнению с амплитудой падающей волны и, соответственно, рост доли энергии падающей волны, поглощаемой пластиной. Внешним проявлением резонанса является

уменьшение зеркального рассеяния пластиной: наблюдавшееся уменьшение ЭПР пластины в направлении отражения луча составляло от нескольких раз до более, чем трех порядков в разных условиях. Устойчивость численного решения задачи дифракции на предложенной ячейке следует из наблюдавшегося плавного изменения числа обусловленности при прохождении даже самого глубокого резонансного снижения ЭПР пластины. Отмечается, что по глубине резонанса можно сравнивать эффективность способов генерации поверхностной волны дифракционными решетками разных типов, либо иными периодическими неоднородностями на поверхности, или в объеме диэлектрика.

Ключевые слова: поверхностная волна, дифракционная решетка, резонансное поглощение, уменьшение ЭПР в направлении отражения луча.

Abstract. Possibility of converting the energy of an incident electromagnetic wave to the energy of a surface wave in a dielectric plate on a metal substrate has been confirmed through numerical simulation. To transfer energy between waves of different structures, a diffraction grating placed on the surface of the plate is used. Energy is retained in the plate through the formation of a surface wave resonator by introducing a flush metal walls along the plate's ends. Thus, the resonant cell with open entrance has been suggested – the energy enters the cell through the whole lit surface of the plate. It is assumed that the dielectric has small losses, and the diffraction grating on its surface consists of the identical bars, which are made of the same dielectric and have small cross section. The resonance in the form of sharp increase of the standing wave amplitude inside the plate, compared to the incident wave amplitude, and correspondingly increase of the incident wave's energy absorption by the plate takes place at some grating periods. The external manifestation of resonance is a decrease of specular scattering from the plate: the observed decrease of plate's RCS in the ray reflection direction was from several times to more than three orders of magnitude under different conditions. Stability of numerical solution of the problem of diffraction on the suggested cell follows from the observed smooth variation of the condition number in the vicinity of even the deepest plate's resonant RCS reduction. Efficiency of surface wave generation by diffraction gratings of different types or by arranging

other periodical inhomogeneities on the surface or within the volume of dielectric can be compared according to the depth of resonance.

Key words: surface wave, diffraction grating, resonant absorption, RCS reduction in the ray reflection direction.

Финансирование: финансирование, если есть.

Автор для переписки: Андрей Михайлович Лебедев, lebedev_am@mail.ru

1. Постановка задачи

Решалась задача возможно более полного преобразования энергии падающей плоской электромагнитной волны (ЭМВ) в энергию поверхностной волны в диэлектрической пластине на металлической подложке. Полагалось, что далее поверхностная волна должна затухать из-за ненулевых омических потерь в диэлектрике. В данной работе для передачи энергии между электромагнитными волнами разной структуры использовалась дифракционная решетка, помещаемая на поверхность пластины. Удержание ЭМВ в пластине было достигнуто путем формирования резонатора поверхностной волны в результате закрытия всех торцов пластины металлическими стенками. Без образования резонатора энергия поверхностной волны излучалась бы вовне пластины в результате рассеяния этой волны на дифракционной решетке. Наоборот, в окрестности резонанса накопление и последующая диссипация энергии падающей ЭМВ в пластине становятся энергетически выгодными, и можно ожидать достижения высокой степени поглощения падающей волны пластиной. В данной работе принято ограничение на использование только не выступающих металлических стенок, закрывающих торцы пластины, при том, что, как хорошо известно, некоторая часть энергии поверхностной волны всегда идет над диэлектриком (смотри, например, [1]) и, следовательно, будет излучаться с краев пластины. Таким образом, в данной работе предложен и исследован определенный тип резонаторной ячейки с открытым входом – последнее означает, что энергия падающей волны входит в ячейку через всю освещенную поверхность пластины.

Отметим, что при преломлении на ровной границе диэлектрика не происходит перехода падающей ЭМВ в поверхностную. Действительно, угол преломления не может быть больше угла полного внутреннего отражения, тогда как волновые фронты, формирующие поверхностную волну в результате переотражений от верхней и нижней граней пластины, должны двигаться под углом больше угла полного внутреннего отражения. Принципиально существование любой неоднородности на поверхности диэлектрического слоя приводит к возбуждению волн в слое, распространяющихся под углами как меньше, так и больше угла полного внутреннего отражения. Здесь в качестве неоднородности, эффективно генерирующей поверхностную волну, используется дифракционная решетка. Для излучения решетки вглубь пластины дифракционный максимум нулевого порядка ориентирован в направлении преломления волны. Вместе с тем для любого направления облучения подходящим выбором периода решетки можно обеспечить совпадение направления движения фронта, формирующего поверхностную волну, и направления дифракционного максимума некоторого ненулевого порядка, что и приведет к существенной генерации поверхностной волны решеткой. В данной работе исследования были выполнены в предположении, что резонирующая поверхностная волна в пластине «запускается» дифракционным максимумом первого порядка решетки.

В данной работе рассмотрение ограничено случаем нормального падения волны на поверхность пластины, при ориентации вектора напряженности электрического поля падающей волны \vec{E}_{nad} параллельно поверхности пластины по ее длине – в том же направлении, в котором по поверхности пластины эквидистантно разнесены элементы решетки. Полагалось, что дифракционная решетка имеет вид брусков на поверхности диэлектрика, имеющих квадратное поперечное сечение со стороной много меньше, чем период решетки d и длина волны в диэлектрике. Постановку задачи иллюстрирует рис. 1. Для выбранной ориентации вектора \vec{E}_{nad} поверхностная волна в диэлектрической пластине на металлической подложке существует при любой толщине пластины a [1].

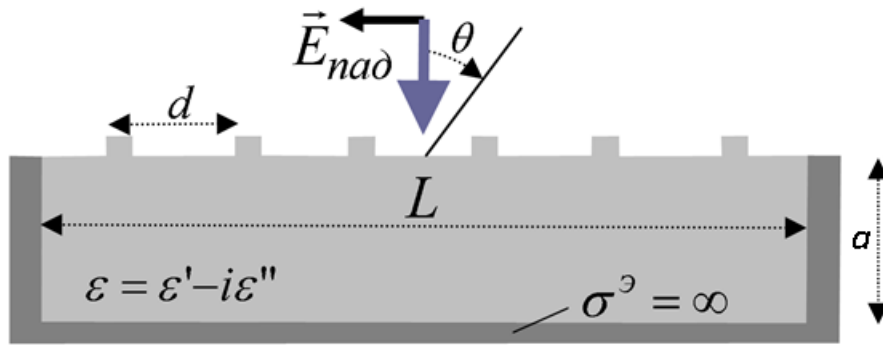


Рис. 1. Геометрия задачи

Численное решение задачи дифракции падающей ЭМВ на предложенной резонаторной ячейке выполнялось методом поверхностных интегральных уравнений с помощью электродинамической САПР FEKO [2]. Была взята частота ЭМВ 10 ГГц. Во всех расчетах принималось, что напряженность электрического поля падающей волны равна одному вольту на метр $|E_{nad}| = 1 \text{ В/м}$. В варианте пластины с малой оптической плотностью действительная часть ее диэлектрической проницаемости ε задавалась равной 2.56 (как для полистирола), а в варианте пластины с большой оптической плотностью – равной 25, при разных значениях тангенса диэлектрических потерь. Длина пластины была принята равной шести периодам дифракционной решетки $L = 6 \cdot d$, ее толщина равной $a = 40 \text{ мм}$. Поперечное сечение брусков-элементов решетки было взято (4x4) мм для пластины с $\text{Re}(\varepsilon) = 2.56$ и (1x1) мм для пластины с $\text{Re}(\varepsilon) = 25$.

2. Описание хода численных экспериментов

Первое приближение для постоянной распространения h и длины поверхностной волны в пластине $\lambda_{ng} = 2\pi/\text{Re}(h)$ находилось как для собственной волны двумерной пластины без дифракционной решетки. В интервале

$$k_o < \text{Re}(h) < k_o \cdot \text{Re}(\sqrt{\varepsilon}), \quad (1)$$

определяющем условия существования поверхностной волны, постоянная распространения h получалась из численного решения дисперсионного уравнения [1]

$$\sqrt{h^2 - k_o^2} - \frac{\sqrt{k_o^2 \cdot \varepsilon - h^2}}{\varepsilon} \cdot \operatorname{tg} \left[\sqrt{k_o^2 \cdot \varepsilon - h^2} \cdot a \right] = 0, \quad (2)$$

где k_o – волновое число свободного пространства. Решения (собственные значения) h уравнения (2) являются комплексными числами ввиду наличия потерь в диэлектрике. Отметим, что для достаточно толстого слоя диэлектрика в интервале, даваемом условиями (1), находятся несколько собственных значений h , соответствующих разным типам волн (модам), отличающимся между собой числом периодов стоячей волны по толщине слоя. При этом на оси $Re(h)$ они идут справа налево с возрастанием числа периодов стоячей волны по толщине. Разработанные алгоритмы позволяют находить все собственные значения h на плоскости комплексного переменного как значения, обеспечивающие обращение в ноль модуля левой части (2).

Наличие дифракционной решетки и конечность ширины пластины W несколько меняют постоянную распространения h собственной волны диэлектрической пластины. Поэтому значение постоянной распространения уточнялось в ходе численного решения серии задач дифракции ЭМВ на пластине по максимуму резонансных явлений при вариации периода решетки d . С учетом нормального падения ЭМВ и, следовательно, синфазного возбуждения элементов решетки падающей волной, наложенное условие возбуждения поверхностной волны первым дифракционным максимумом решетки означает, что на максимуме генерации поверхностной волны решеткой ее период d будет совпадать с длиной поверхностной волны λ_{ng} . Поэтому в качестве первого приближения для периода дифракционной решетки бралось значение $d = 2\pi/Re(h)$, где h – решение уравнения (2). В окрестности резонанса поверхностной волны внутри пластины формируется стоячая волна с числом периодов по длине пластины, равным удвоенному числу элементов

дифракционной решетки, и с амплитудой, достигающей существенных значений. В свою очередь, увеличение амплитуды стоячей волны означает рост поглощения энергии падающей волны пластиной. Поэтому в качестве внешнего проявления резонанса ожидается уменьшение зеркального рассеяния в направлении отражения луча от поверхности пластины. Соответственно, в сериях расчетов резонансных кривых в работе прослеживались изменение амплитуды напряженности электрического поля стоячей волны внутри пластины и изменение ЭПР пластины в направлении отражения луча, в зависимости от изменения периода дифракционной решетки d .

Поскольку при облучении пластины по нормали к поверхности направления зеркального и обратного рассеяния совпадают, то в расчетах прослеживалось изменение моностатической ЭПР пластины.

Длина пластины была принята равной целому числу периодов дифракционной решетки (здесь $L = 6 \cdot d$), так что в численных экспериментах одновременно с вариацией периода решетки d изменялась и длина пластины L , – это обеспечивало прохождение резонанса поверхностной волны при некотором периоде решетки.

Уточним, что в расчетах ширина диэлектрической пластины была принята достаточно большой $W = 90$ мм (три длины волны в свободном пространстве). Поэтому влияние конечности ширины пластины на значение постоянной распространения в ней поверхностной волны было весьма слабым. Наблюдения показали, что по ширине пластины W между ее заматаллизированными боковыми торцами во всех случаях расчета укладывался один период стоячей волны.

3. Результаты моделирования резонанса поверхностной волны в пластине с малой оптической плотностью

В окрестности резонанса низшего типа поверхностной волны поле внутри пластины с $Re(\varepsilon) = 2.56$ действительно приняло вид стоячей волны с одним полупериодом стоячей волны по толщине пластины и с числом периодов по

длине пластины, равным 12, смотри рис. 2 (приведенное здесь распределение поля в пластине соответствует тангенсу потерь 10^{-6}).

Как видно из хода графиков на рис. 3,4, с уменьшением тангенса потерь от 10^{-4} до 10^{-5} наблюдалось нарастание резонансных эффектов: амплитуда стоячей волны в пластине возросла приблизительно от 25 до 50 амплитуд падающей волны (рис. 3), а падение моноэлектронной ЭПР по нормали к пластине увеличилось с полутора до трех раз (рис. 4).

С дальнейшим уменьшением тангенса потерь уровни максимальной амплитуды стоячей волны и минимальной ЭПР стабилизировались, как это следует из рис. 3, 4, поскольку, очевидно, определялись уже не омическими потерями в объеме диэлектрика, а эффективными потерями за счет излучения поверхностной волны с краев пластины.

4. Наблюдение резонанса поверхностной волны в пластине с большой оптической плотностью

Для оптически более плотного материала пластины с $Re(\varepsilon) = 25$ был исследован резонанс поверхностной волны с существенно большей $Re(h)$ – возможность этого следует из увеличения верхнего предела в условии (1). Поскольку с возрастанием действительной части постоянной распространения h поверхностная волна существенно более прижата к поверхности пластины с внешней стороны, то, следовательно, она характеризуется значительно меньшими потерями на излучение с краев пластины, так что резонанс поверхностной волны более выражен.

Ранее отмечалось, что из всех возможных типов поверхностной волны действительная часть постоянной распространения наиболее близка к верхнему пределу в (1) именно для низшей моды. Однако с увеличением оптической плотности диэлектрика прежде всего именно для низшей моды величина $Re(h)$ становится весьма чувствительной к введению дифракционной решетки на поверхности пластины. Более того, наблюдались даже изменения типа волны в пластине с низшего на существенно более высокий после введения решетки.

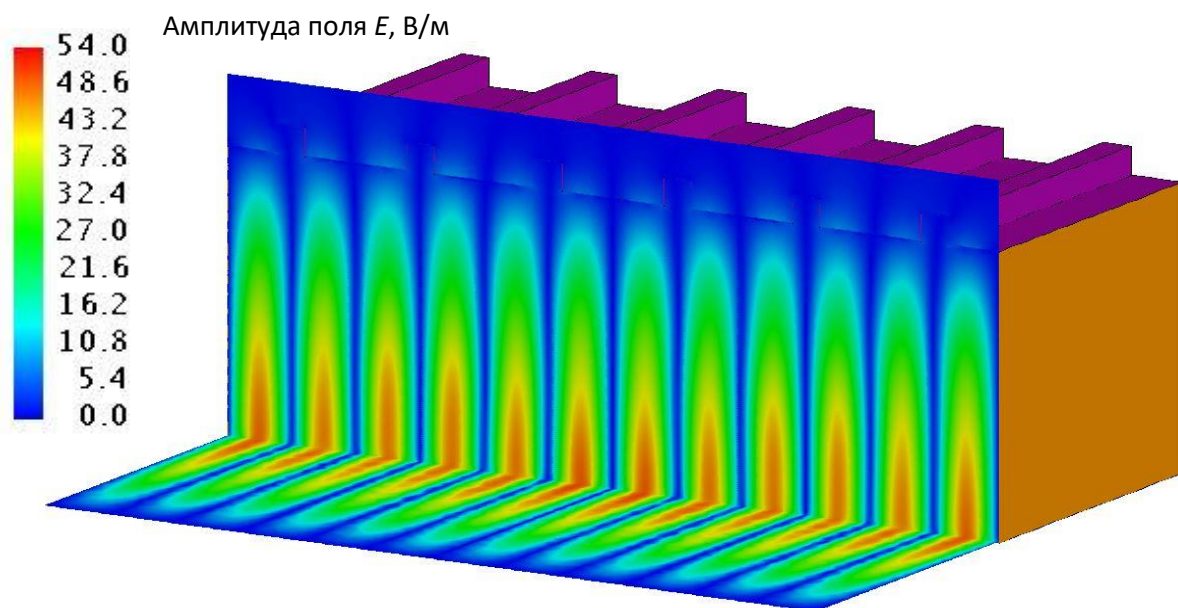


Рис. 2. Структура поля внутри пластины в окрестности резонанса.
Диэлектрическая проницаемость пластины $\varepsilon = 2.56 \cdot (1 - i \cdot 10^{-6})$, период решетки $d = 18.958$ мм

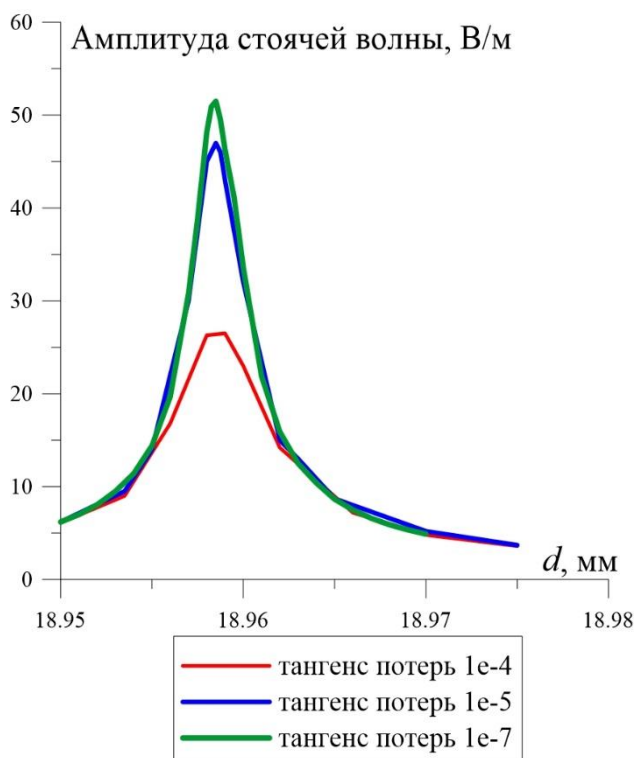


Рис. 3. Зависимость амплитуды стоячей волны в диэлектрической пластине от периода дифракционной решетки d , пластина с $Re(\varepsilon) = 2.56$

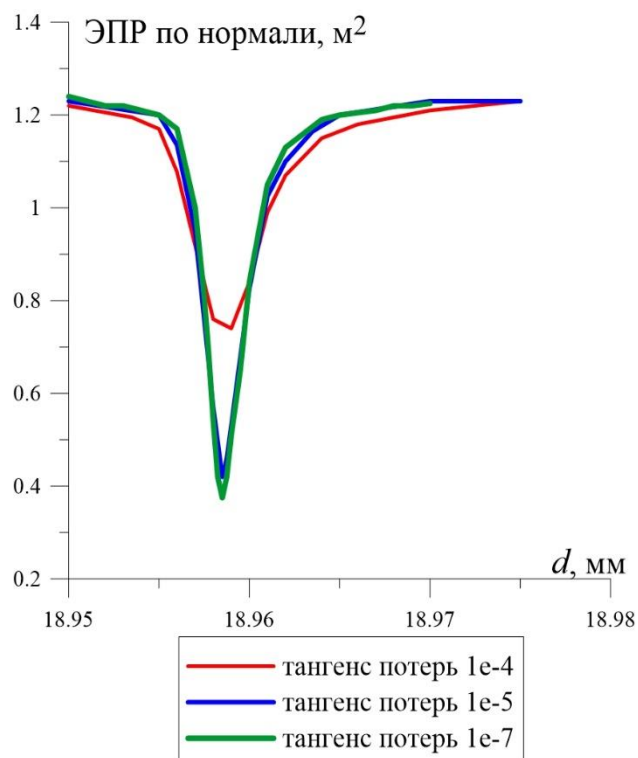


Рис. 4. Зависимость ЭПР диэлектрической пластины по нормали к поверхности от периода дифракционной решетки d , пластина с $Re(\varepsilon) = 2.56$

Вследствие этого обнаружение резонанса низшей моды поверхностной волны в пластине с дифракционной решеткой оказывается весьма трудоемким. Поэтому

для оптически более плотной пластины был намеренно исследован резонанс 10-ой моды поверхностной волны, для которой характерно формирование 9 с половиной периодов стоячей волны по толщине, при 12 периодах по длине пластины. Для 10-ой моды $Re(h)$ относительно слабо чувствительна к введению дифракционной решетки, по сравнению с низшим типом волны. Получающаяся в расчетах структура поля в пластине на резонансе 10-ой моды поверхностной волны приведена на рис. 5, – этот и другие результаты расчетов в этом разделе соответствуют значению тангенса потерь 10^{-6} . Полученное в численных экспериментах значение $Re(h)$ в оптически более плотной пластине на резонансе 10-ой моды действительно значительно больше, чем в оптически менее плотной пластине на резонансе 1-ой моды. Это следует из сравнения периодов дифракционных решеток, при которых наблюдались резонансные увеличение амплитуды стоячей волны в пластине и уменьшение ЭПР в направлении нормали к пластине, зеркальном по отношению к направлению падения, смотри соответствующие графики на рис. 6, 7 и рис. 3, 4.

Поскольку по условиям расчета поперечные сечения брусков дифракционной решетки для оптически плотного диэлектрика были взяты существенно меньшими, то бруски имели значительно меньшую «излучающую способность». Поэтому и амплитуда стоячей волны в оптически более плотной пластине в окрестности резонанса получилась в расчетах несколько меньше, чем для оптически менее плотной пластины (рис. 3, 6). Однако полученное в расчетах уменьшение ЭПР оптически более плотной пластины в зеркальном направлении на резонансе оказалось значительно более глубоким – более, чем на три порядка (рис. 4, 7).

Последовательное изменение вида бистатической диаграммы рассеяния пластиной с дифракционной решеткой на поверхности при прохождении резонанса поверхностной волны иллюстрирует рис. 8. Здесь угол θ ,

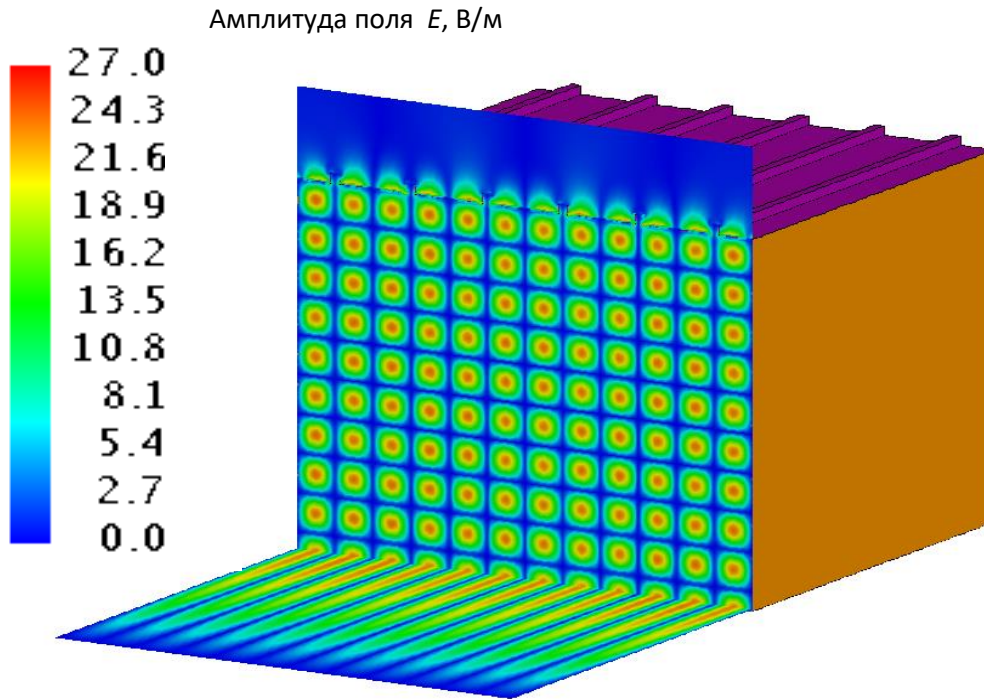


Рис. 5. Структура поля внутри пластины в окрестности резонанса.
Диэлектрическая проницаемость пластины $\varepsilon=25 \cdot (1 - i 10^{-6})$, период решетки $d = 8.52478$ мм

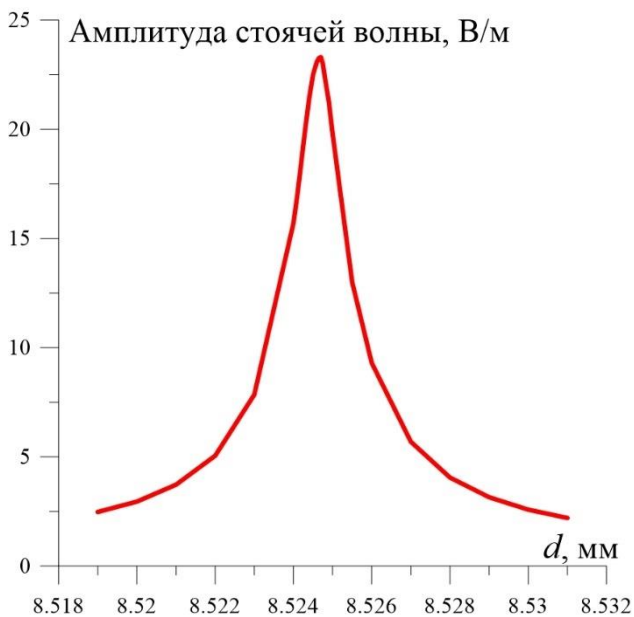


Рис. 6. Зависимость амплитуды стоячей волны в диэлектрической пластине от периода дифракционной решетки d , пластина с $Re(\varepsilon)=25$ и тангенсом потерь 10^{-6}

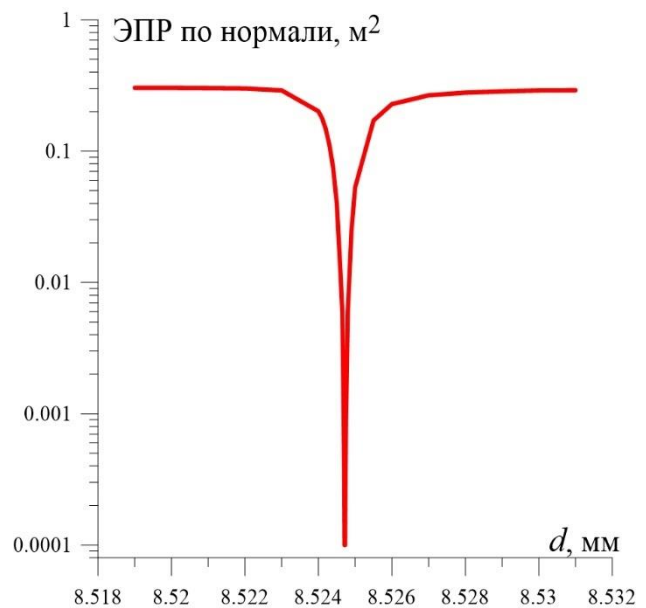


Рис. 7. Зависимость ЭПР диэлектрической пластины по нормали к поверхности от периода дифракционной решетки d , пластина с $Re(\varepsilon)=25$ и тангенсом потерь 10^{-6}

характеризующий направление наблюдения, отсчитывается от нормали к поверхности пластины, как это показано на рис. 1. Вне резонанса зеркальный

лепесток в окрестности направления отражения луча $\theta = 0^\circ$ весьма высок и соизмерим по высоте с теневым лепестком в окрестности направления $\theta = \pm 180^\circ$. Значительная высота зеркального лепестка объясняется, очевидно, наличием металлической подложки за слоем диэлектрика. На резонансе зеркальный лепесток буквально втягивается пластиной, так что на месте локального максимума ЭПР в окрестности направления отражения луча образуется глубокий провал диаграммы рассеяния. При этом в остальных направлениях изменения уровня бистатической ЭПР невелики. В том числе, разумеется, при прохождении резонанса в практически неизменном виде сохраняется и теновый лепесток диаграммы. После прохождения резонанса зеркальный лепесток диаграммы приблизительно восстанавливается.

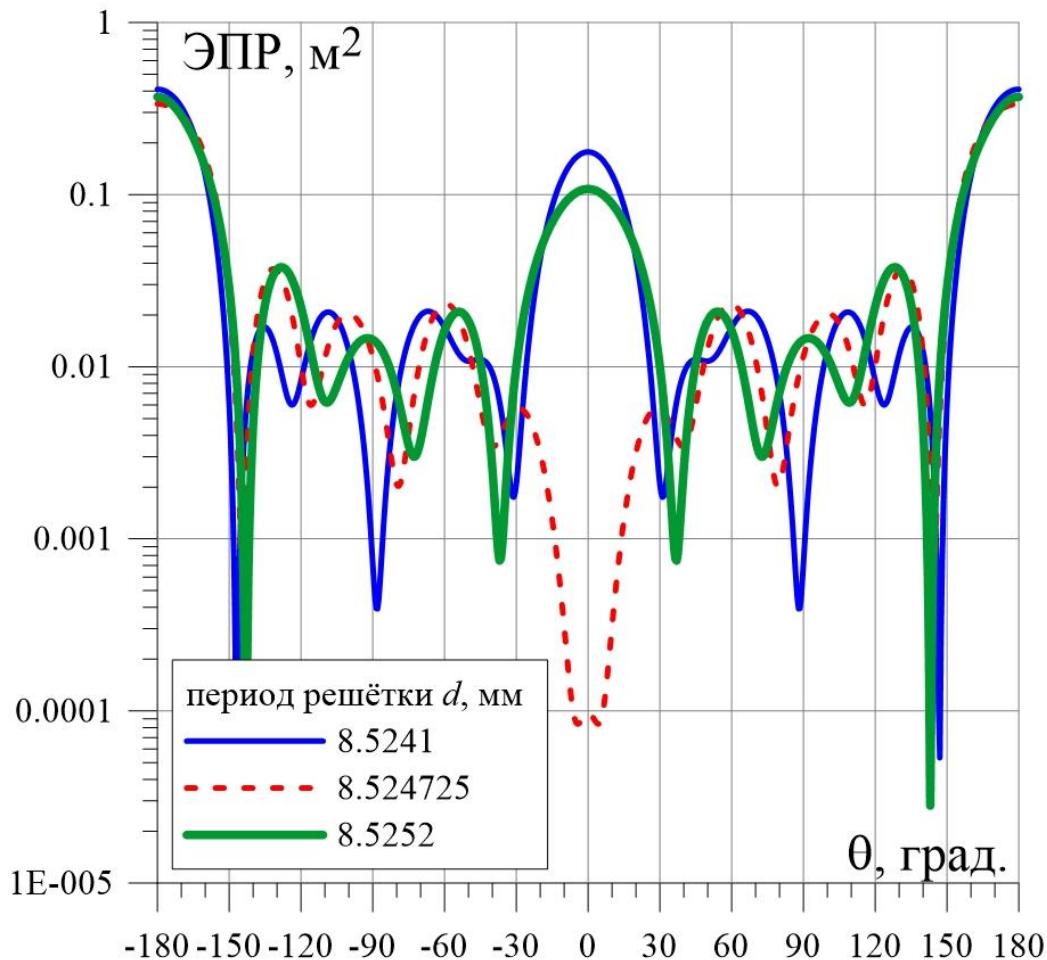


Рис. 8. Изменение двухпозиционной диаграммы рассеяния диэлектрической пластиной с дифракционной решеткой при прохождении резонанса поверхностной волны. Пластина с $Re(\varepsilon)=25$ и тангенсом потерь $1e-6$

Таким образом, единственным значительным изменением бистатической диаграммы рассеяния пластиной при прохождении резонанса поверхностной волны является большое резкое уменьшение, а затем восстановление амплитуды зеркального лепестка диаграммы.

С физической точки зрения исчезновение зеркального лепестка диаграммы рассеяния говорит о том, что резонирующая мода вбирает ту энергию, которая могла бы приходиться на другие типы пространственного распределения поля в пластине. Здесь наблюдается отбор энергии резонирующей поверхностной волной u , казалось бы, основного процесса, заключающегося в последовательном преломлении падающей волны в пластину, отражении преломленной волны от подложки и, наконец, обратном выходе волны в свободное пространство, – за счет этого процесса и формируется зеркальный лепесток диаграммы.

5. Устойчивость результатов численных расчетов при прослеживании резонансов поверхностной волны в диэлектрической пластине

Была проверена устойчивость численного решения задачи дифракции ЭМВ на предложенной резонаторной ячейке в окрестности резонанса поверхностной волны. Во-первых, при прохождении резонанса не хаотизировалось изменение ни структуры поля внутри и вблизи диэлектрика, ни диаграммы двухпозиционного рассеяния. Действительно, и на резонансе, и в его окрестности внутри пластины наблюдались стоячие волны постоянной структуры по длине, ширине и толщине пластины, в соответствии с типом резонирующей моды, а поле вне диэлектрика экспоненциально затухало при удалении от поверхности пластины. Также при прохождении резонанса сохранялись и вид теневого лепестка в составе двухпозиционной диаграммы рассеяния пластины, и общий уровень ЭПР в широкой угловой окрестности зеркального лепестка диаграммы. Во-вторых, проверка показала, что число обусловленности СЛАУ, к решению которой сводится решение дифракционной задачи, упорядоченно и достаточно плавно менялось даже при прохождении

самого глубокого из резонансов, наблюдавшихся в данной работе, как это следует из хода графиков на рис. 9.

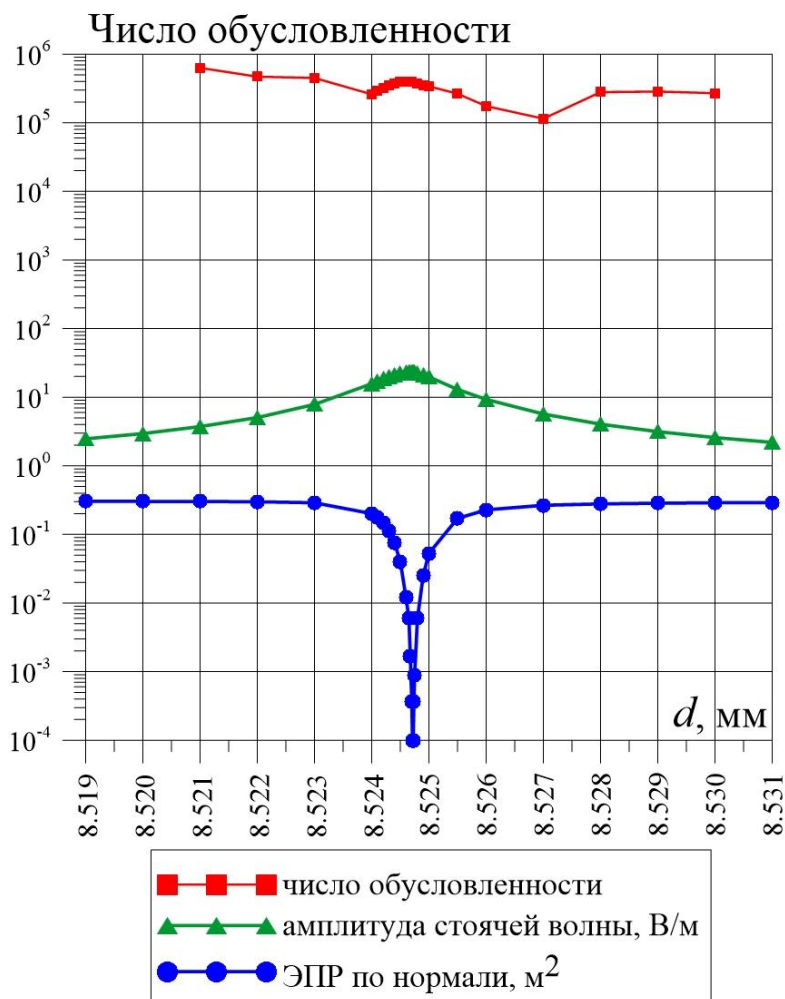


Рис. 9. Зависимость числа обусловленности от периода дифракционной решетки d на поверхности диэлектрической пластины, в сравнении с зависимостями амплитуды стоячей волны и ЭПР пластины по нормали к ее поверхности. Пластина с $Re(\epsilon)=25$ и тангенсом потерь $1e-6$

Целесообразно отметить, что обычно для получения весьма точного численного решения задачи дифракции ЭМВ на металлическом объекте, либо на металлическом объекте с включениями из оптически плотных материалов с большими потерями, достаточно взять интервал дискретизации $\sim \lambda_o/10$ [2]. Однако при наличии резонансов во внутренних областях, заполненных оптически плотной средой с малыми потерями, как, например, в предложенной ячейке на основе диэлектрической пластины, для передачи структуры поля на резонансе необходимо брать существенно меньший интервал дискретизации $\sim \lambda_\epsilon/10$, тогда как при использовании обычного интервала дискретизации $\sim \lambda_o/10$,

резонанс просто не будет отслежен. Здесь λ_o и λ_ϵ – длины волн в свободном пространстве и в диэлектрике.

Заключение

1. Наблюдалось резонансное поглощение энергии падающей волны вследствие ее перехода в энергию поверхностной волны, возбуждаемой в резонаторной ячейке с открытым входом. Ячейка представляет собой диэлектрическую пластину с дифракционной решеткой на поверхности, находящуюся на металлической подложке и имеющую боковые грани, закрытые не выступающими металлическими стенками. Хотя добротность резонанса ограничивается потерями энергии поверхностной волны на излучение с краев пластины, но для оптически плотной пластины наблюдался резонанс поверхностной волны, проявлявшийся как уменьшение ЭПР в направлении зеркального отражения (при принятом условии облучения пластины по нормали к поверхности – как уменьшение моностатической ЭПР) на более, чем три порядка.

2. По глубине минимума зеркального рассеяния электромагнитной волны, получаемого на резонансе поверхностной волны, можно сравнивать эффективность возбуждения поверхностной волны в диэлектрической пластине разными типами дифракционных решеток, вообще периодическими неоднородностями разного рода на поверхности и в объеме диэлектрика, например, объемными голограммами, как это предложено в [3]. Возникает возможность уйти от некорректного сравнения эффективностей разных способов генерации поверхностной волны просто при одинаковом расстоянии между периодическими неоднородностями в условиях, когда неясно, насколько взятое расстояние обеспечивает максимум преобразования в поверхностную волну для сравниваемых способов. С учетом наличия этапа подстройки периода неоднородности каждого типа для достижения резонанса поверхностной волны, при таком сравнении разная степень влияния приповерхностной неоднородности на постоянную распространения поверхностной волны в диэлектрике будет

учтена, – это и позволит наиболее объективно сравнить эффективность способов возбуждения поверхностной волны.

3. Предложенную в работе резонансную ячейку с открытым входом можно использовать как элемент с включаемым дистанционным нагревом, либо как элемент с переменным коэффициентом отражения, при управляющем воздействии, состоящем в малом изменении частоты падающей волны. Также структуры в виде диэлектрической пластины с дифракционной решеткой на поверхности, при том, что пластина либо находится, как в данной работе, либо не находится на металлической подложке, могут быть использованы как основа для полосно-пропускающих, либо запирающих фильтров.

Литература

1. Баскаков С.И. *Электродинамика и распространение радиоволн*. Москва, Высшая школа. 1992. 416 с.
2. Feko, <https://www.altair.com>
3. Ignatov A.I., Merzlikin A.M. Excitation of plasmonic waves in metal-dielectric structures by a laser beam using holography principles. *Opt. Comm.* 2018. V.410. P.83-87

Для цитирования:

Лебедев А.М., Обухов М.Л. Резонаторная ячейка с открытым входом на основе диэлектрической пластины на металлической подложке. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №2.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.1>