

РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ ПЛАНАРНЫЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД – ГРЕБЕНКА

В. В. Крыжановский, С. В. Крыжановский, С. А. Стешенко, О. В. Чистякова

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: sergiy.steshenko@gmail.com*

Численно исследованы резонансные свойства системы планарный диэлектрический волновод – гребенка. Выполнена классификация видов резонансов, возникающих при изменении параметров системы, включая размеры канавок, толщину диэлектрического волновода и расстояние между волноводом и гребенкой. Дан ряд практически полезных рекомендаций по выбору параметров волновода и решетки при создании антенн. Ил. 9. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: миллиметровые волны, дифракционная решетка, планарный диэлектрический волновод.

Взаимодействие неоднородных плоских волн с периодическими рассеивателями уже на протяжении нескольких десятилетий привлекает внимание исследователей. Это обусловлено как до сих пор не изученными фундаментальными характеристиками системы диэлектрический волновод – решетка, так и перспективами разработки высокоэффективных антенн дифракционного излучения [1, 2]. Другим не менее важным направлением было и остается изучение взаимодействия модулированного электронного потока с периодическими рассеивателями для генерации и усиления крайне высокочастотных (КВЧ) сигналов. Электродинамическая структура, состоящая из планарного диэлектрического волновода и дифракционной решетки в виде гребенки, в данном отношении может считаться ключевой, поскольку находит наибольшее практическое применение. С другой стороны, она допускает исследование строгими математическими методами, а основные физические закономерности, детально исследованные в ней, проявляются в той или иной степени и в более сложных трехмерных системах, например, в системах с гребневым диэлектрическим волноводом и гребенкой конечной ширины.

Целью работы является изучение эффектов резонансного взаимодействия собственных волн планарного диэлектрического волновода с дифракционной решеткой типа гребенки, классификация видов резонансов и обоснование практических рекомендаций по выбору параметров излучающей системы.

1. Описание методики исследований.

Анализ, представленный ниже, основывается на работе [3], где в строгой постановке решена задача о взаимодействии E -волн планарного диэлектрического волновода 1 с гребенкой 2 конечной длины (рис. 1), расположенной параллельно поверхности волновода на произвольном расстоянии Δ . Толщина диэлектрического волновода и количество излучающих элементов – щелей являются параметрами и могут принимать произ-

вольные значения. Размеры всех щелей и расстояния между ними могут выбираться индивидуально, что значительно расширяет область применимости модели, например, в технике изготовления переходов между разнородными линиями поверхностных волн, фильтров на основе дифракции Брэгга и т. д.

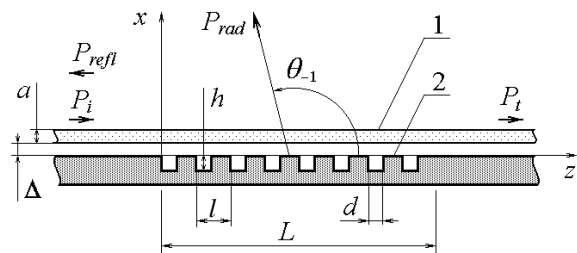


Рис. 1. Электродинамическая система планарный диэлектрический волновод – гребенка

Исходной структурой в задаче служит планарный диэлектрический волновод над бесконечной металлической подложкой. При малых значениях расстояния Δ между волноводом и подложкой последняя сильно влияет на фазовую скорость и на структуру поля собственной волны планарного диэлектрического волновода. Данный факт учтен на этапе постановки задачи, так что падающая E_1 -волна в структуре волновод – подложка имеет меньшую фазовую скорость, чем E_1 -волна планарного диэлектрического волновода, расположенного в свободном пространстве. В области над решеткой E_1 -волна становится вытекающей, с характерным экспоненциальным спаданием напряженности поля вдоль оси oz аналогично структурам [4] и фазовой скоростью, зависящей от параметров решетки.

В соответствии с моделью нами приняты следующие обозначения (см. рис. 1): P_i – падающая мощность основной E_1 -волны планарного волновода над металлической подложкой; P_t – прошедшая мощность; P_{rad} – излученная мощ-

ность; P_{ref} – отраженная мощность; θ_{-1} – угол излучения минус первой пространственной гармоники решетки; $U = c/v$ – коэффициент замедления собственной волны планарного волновода, где c – скорость света в свободном пространстве, v – фазовая скорость собственной волны. На всех графиках, приведенных на рис. 2-7, по оси ординат отложена величина прошедшей мощности, измеряемая в децибелах ($10\lg(P_i/P_0)$), которая характеризует потери в системе на излучение и отражение. При условии малости краевых эффектов и пренебрежимо малом коэффициенте отражения величина ослабления полностью характеризует эффективность преобразования медленной поверхностной волны диэлектрического волновода в объемную. В процессе вычислений параметры системы выбирались таким образом, чтобы эти условия выполнялись.

В модели определяются коэффициенты прохождения и отражения собственной волны в планарном диэлектрическом волноводе, ближнее поле, диаграмма направленности структуры и дополнительный фазовый сдвиг, вносимый решеткой в медленную волну. В работе рассмотрен случай идентичных канавок в гребенке. Для определения свойств решетки исследована группа из 20 канавок. При таком количестве излучающих элементов краевые эффекты вносят незначительный вклад в дифракционные явления, что было доказано численными экспериментами с группами от 5 до 40 канавок. При количестве излучающих элементов более 20 наблюдается практически линейная зависимость отбора мощности от количества элементарных излучателей.

Достоверность получаемых расчетных данных была проверена путем их сравнения с экспериментальными. Расхождение значений коэффициентов ослабления не превышало 0,1 дБ в интервале измеряемых значений 2÷4 дБ в нескольких произвольно выбранных точках, что полностью подтверждает работоспособность модели и соответствующих программ.

2. Классификация видов резонансов.

Резонансные эффекты, сопровождающие взаимодействие медленной поверхностной волны с гребенкой, достаточно разнообразны по своей природе. Проведем предварительную их классификацию, которая не может считаться окончательной, однако дает общую картину физических эффектов, наблюдающихся в системе. Во-первых, это резонанс по глубине h единичного излучателя – щели. Этот вид резонанса хорошо изучен в рамках исследований по взаимодействию модулированного электронного потока с гребенкой [5], что же касается случая с диэлектрическим волноводом с малым значением диэлектрической проницаемости ε , то он требует дополнительного внимания. В первом приближении щель представляет

собой короткозамкнутый с одной и разомкнутый с другой стороны отрезок длинной линии, т. е. некоторый резонатор с максимальной напряженностью электрического поля вынужденных колебаний у открытого конца при $h \approx \lambda_0/4 + m\lambda_0/2$, где λ_0 – длина волны в свободном пространстве; $m = 0, 1, 2, \dots$, и минимальной – при $h \approx m\lambda_0/2$.

Второй вид резонанса – это резонанс по толщине a слоя диэлектрика, которым является диэлектрический волновод (рис. 1) для объемной волны, идущей от гребенки в сторону положительных значений x . Данный вид резонанса присущ слою диэлектрика в отдельности и, как известно, проявляется в периодическом изменении прозрачности слоя в зависимости от a . При этом период этой зависимости $\lambda_0 e^{-\gamma/2} / (2 \sin \theta')$ зависит от угла падения объемной волны на слой диэлектрика. Здесь θ' – угол распространения плоской волны в слое диэлектрика, отсчитываемый от оси oz . В принятых в оптике обозначениях ($\theta - 90^\circ$) – угол падения плоской волны на слой диэлектрика, ($\theta' - 90^\circ$) – угол преломления. На протяжении длительного времени при исследовании эффекта дифракционного излучения прозрачность диэлектрического волновода вообще не принималась во внимание. При теоретическом рассмотрении дифракционных явлений использовался метод заданного тока, а экспериментальные исследования проводились при таких малых значениях расстояния волновод – решетка, что поле высших пространственных гармоник в значительно большей степени влияло на эффект преобразования медленных поверхностных волн в объемные, чем сопутствующие резонансы.

Третий вид резонанса в системе диэлектрический волновод – гребенка – это резонанс, связанный с расстоянием Δ между волноводом и поверхностью решетки. Параллельно расположенные гребенка и полупрозрачный слой диэлектрика образуют своеобразный открытый резонатор, в котором следует ожидать появления резонансных колебаний с периодичностью $\lambda_0 / (2 \sin \theta)$ по расстоянию Δ . Достоверных свидетельств существования таких колебаний пока не было, по видимому, потому, что для их экспериментального обнаружения необходим достаточно большой диапазон изменения величины Δ , по крайней мере, несколько длин волн, а возможности измерений ограничены величиной Δ , не превосходящей одну длину волны. Кроме того, маскирующим фактором служит экспоненциальное спадание напряженности поля диэлектрического волновода во внешнем пространстве.

Четвертый параметр, влияющий на добротность колебательной системы, – период дифракционной решетки l . Единичные излучающие элементы дифракционной решетки, обладающие ярко выраженными индивидуальными резонанс-

ными свойствами, влияют друг на друга за счет связи по объемной волне через свободное пространство и через поверхностную волну диэлектрического волновода. Период l играет роль регулятора коэффициента связи, так как изменяет фазовые и амплитудные соотношения волн, рассеянных смежными излучателями. Изучение влияния периода l на эффективность преобразования энергии является основой для разработки направленных ответвителей и других элементов связи и дифракционного ввода-вывода энергии, построенных на принципах интегральной оптики [6].

Перечисленные резонансные явления можно считать основными, и они будут детально исследованы ниже. Помимо них можно выделить эффекты Брэгговского отражения при величине периода l кратного половине длины волны в диэлектрическом волноводе и резонансные эффекты по длине дифракционной решетки L в случае существенного коэффициента отражения поверхностной волны от начала и конца решетки, например, при $\Delta = 0$. Особым видом резонансного эффекта является влияние малого расстояния Δ на резонансную частоту единичного излучающего элемента вследствие введения диэлектрика в резонансное поле излучателя. И наконец, все перечисленные резонансы накладываются друг на друга при изменении длины волны и фиксированных геометрических размерах структуры. Большое многообразие наблюдаемых явлений не позволяет исследовать их в рамках одной статьи, поэтому ограничимся четырьмя главными факторами.

3. Анализ влияния резонансов на эффективность преобразования поверхностных волн в объемные. Первая зависимость, характеризующая резонансные свойства гребенки при изменении глубины канавок, изображена на рис. 2. Исследован диэлектрический волновод с величиной $\varepsilon = 3,0$, которая обеспечивает достаточный диапазон изменения прозрачности планарного волновода для проходящей через него объемной волны. Для случая, изображенного на рис. 2, толщина диэлектрического волновода выбрана равной $a/\lambda_0 = \varepsilon^{-1/2}/2 = 0,288$, другими словами, рассматривается волновод, прозрачный для $\theta \approx 90^\circ$. Коэффициент замедления собственной волны планарного волновода при $\Delta \rightarrow \infty$ составляет $U = 1,252$. Диапазон изменения глубины канавки h составляет $(0,02 \div 0,45)\lambda_0$ и полностью перекрывает зону первого типа колебания для $h = 0,25\lambda_0$. Дифракционная решетка состоит из двадцати излучающих элементов, расположенных с периодом $l = 0,7\lambda_0$, что обеспечивает одноволновый режим излучения в направлении $\theta = 100,1^\circ$. Параметром семейства кривых служит расстояние волновод – решетка. Ширина канавок $d = 0,2\lambda_0$.

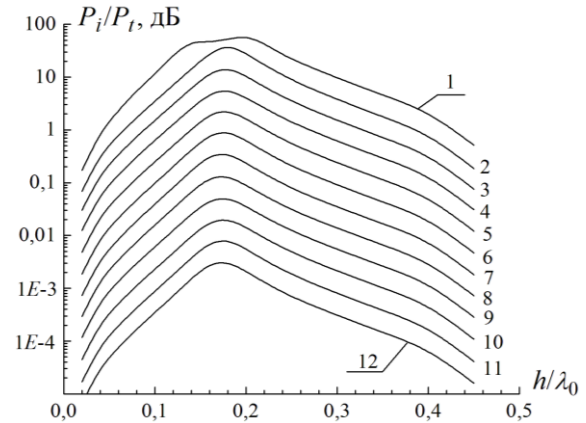


Рис. 2. Зависимость отбора мощности в системе от глубины канавок дифракционной решетки для прозрачного диэлектрического волновода: 1 – $\Delta/\lambda_0 = 0,1$; 2 – $\Delta/\lambda_0 = 0,2$; ... 12 – $\Delta/\lambda_0 = 1,2$

Все кривые на рис. 2 (за исключением случая сильной связи ($\Delta = 0,1\lambda_0$)) имеют одну и ту же форму и расположены эквидистантно по оси децибел. Соответственно, добротность резонансных кривых одинакова и не зависит от расстояния Δ волновод – решетка. Этот, казалось бы, очевидный факт скорее является исключением в большом многообразии излучающих систем, чем правилом. Такое поведение характерно только для случая «прозрачного» диэлектрического волновода, когда объемная волна, сформированная решеткой, беспрепятственно проходит полуволновый слой диэлектрика.

Диапазон плавного изменения эффективности преобразования поверхностной волны в объемную при варьировании глубины канавки составляет два с половиной порядка как при уменьшении, так и при увеличении глубины h от резонансного значения. Плавное изменение глубины канавки вдоль области взаимодействия поверхностной волны с решеткой можно использовать для формирования заданного амплитудного распределения на выходной апертуре излучающей структуры. Например, близкое к линейному закону уменьшение глубины от $0,45\lambda_0$ до $0,02\lambda_0$ может обеспечить спадание поля к краям апертуры до -20 дБ. Этот вариант имеет преимущества по сравнению с обратным случаем плавного увеличения глубины канавки, так как позволит получать более симметричные распределения из-за различного наклона боковых областей резонансной кривой.

В случае прозрачного диэлектрического волновода положение максимума резонансной кривой фиксировано при слабой и не слишком сильной связи волновода с решеткой. Точное его положение зависит от параметров гребенки и коэффициента замедления диэлектрического волновода. Среди общих закономерностей можно отметить некоторое смещение максимума от величин

ны $h = \lambda_0/4$ в сторону меньших значений ($h = 0,175\lambda_0$). Этот эффект хорошо известен в генераторах дифракционного излучения, наглядно он объясняется наличием дополнительной краевой емкости у фланца каждой щели. Примечательным здесь является практически одинаковое смещение максимума как в случае диэлектрического волновода ($U = 1,2 \div 1,3$; $l \approx 0,7\lambda_0$), так и в случае электронного потока ($U \approx 10$; $l \approx 0,1\lambda_0$).

Эквидистантное расположение кривых на рис. 2 в выбранном логарифмическом масштабе по оси децибел свидетельствует о линейном уменьшении отбора с ростом величины Δ . Этот случай иллюстрируется прямой линией 3 на рис. 3, на котором приведены зависимости ослабления проходящей мощности для диэлектрических волноводов различной толщины. Из всех зависимостей только кривая 3 соответствует прозрачному волноводу. Так же, как и на рис. 2, дифракционная решетка образована двадцатью элементами, а ее относительные размеры равны $l = 0,7\lambda_0$; $d = 0,2\lambda_0$; $h = 0,18\lambda_0$. Угол излучения θ указан для $\Delta \geq 2\lambda_0$, так как при меньших значениях он меняется из-за влияния решетки на фазовую скорость волны в диэлектрическом волноводе.

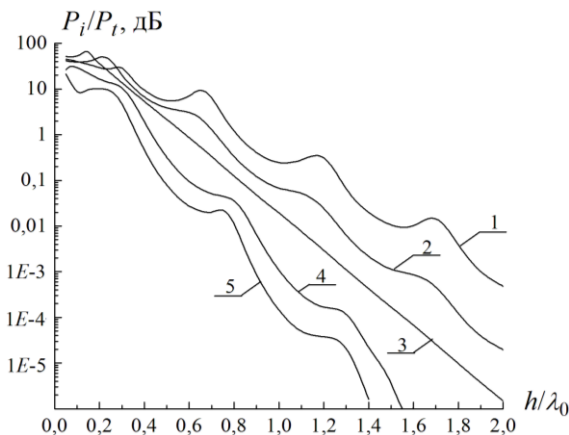


Рис. 3. Зависимость отбора мощности в системе от расстояния волновод – решетка: 1 – $a/\lambda_0 = 0,2$, $\theta = 108,3^\circ$; 2 – $a/\lambda_0 = 0,25$, $\theta = 103,8^\circ$; 3 – $a/\lambda_0 = 0,288$, $\theta = 100,1^\circ$; 4 – $a/\lambda_0 = 0,35$, $\theta = 94,41^\circ$; 5 – $a/\lambda_0 = 0,4$, $\theta = 90,64^\circ$

Средний наклон кривых на рис. 3 определяется спаданием напряженности поля диэлектрического волновода во внешнем пространстве. Для тонкого диэлектрического волновода (кривая 1) он минимальный, для толстого (кривая 5) – максимальный. Отчетливо прослеживаются осцилляции отбора мощности, амплитуда которых растет по мере увеличения коэффициента отражения слоя диэлектрика. Период осцилляций равен половине длины волны. Таким образом, можно считать доказанным существование второго и третьего видов резонансов в системе диэлектрический волновод – решетка. Осцилляции отбора

мощности появляются только при наличии заметного коэффициента отражения от боковой поверхности диэлектрического волновода для падающей на нее объемной волны. В некотором приближении эта объемная волна складывается с поверхностной волной диэлектрического волновода и увеличивает или уменьшает напряженность поля, возбуждающего элементы дифракционной решетки. Другая более точная трактовка должна учитывать открытый резонатор, образованный параллельно расположенными слоем диэлектрика и решеткой. Здесь следует отметить, что строгое решение краевой электродинамической задачи, используемое в рамках нашей работы, по определению учитывает все без исключения особенности электродинамической системы и все наблюдаемые в ней эффекты. Тем не менее, выделение в отдельные группы тех или иных явлений имеет очень большое значение для практического использования эффекта дифракционного излучения. Корректный выбор толщины диэлектрического волновода так же важен, как выбор периода решетки или размеров щели.

Прозрачные диэлектрические волноводы обеспечивают монотонную и однозначную зависимость отбора мощности от расстояния Δ . Сказанное справедливо не только по отношению к планарным диэлектрическим волноводам, но также линейным: эллиптического и прямоугольного поперечного сечения. И если в этих случаях понятие прозрачности определить достаточно сложно, то понятие минимума коэффициента отражения для падающей на боковую поверхность объемной волны вполне корректно и поддается прямым экспериментальным измерениям.

Целесообразность применения «прозрачных» диэлектрических волноводов совсем не означает их безусловного применения во всех случаях. Так, на рис. 3 можно найти области взаимно однозначного соответствия уровня отбора мощности и расстояния волновод – решетка. Для кривой 5 это интервал $\Delta = (0,2 \div 0,65)\lambda_0$, для кривой 1 – $(0,65 \div 1,0)\lambda_0$. При этом диэлектрический волновод с большим коэффициентом замедления обеспечивает больший динамический диапазон уровней отбора мощности. В обоих случаях максимальной величины отбора ≥ 10 дБ вполне достаточно для обеспечения КПД $\geq 90\%$ при двадцати излучающих элементах и более.

Среди особенностей поведения зависимостей на рис. 3 можно отметить ограничение уровня отбора мощности величиной ≈ 40 дБ при очень сильной связи ($\Delta < 0,1\lambda_0$). До конца этот эффект еще не изучен, одна из возможных причин такого поведения – прямое прохождение объемной волны из области начала решетки в область конца. В таком случае ослабление сигнала на 40 дБ уже не свидетельствует об истинном

ослаблении поверхностной волны диэлектрического волновода по экспоненциальному закону, а говорит об ослаблении сигнала на радиотрассе от первой неоднородности структуры до второй. Другая особенность – смена местами максимумов и минимумов для кривых, лежащих выше и ниже прямой 3. Это связано с изменением фазы коэффициента отражения объемной волны от слоя диэлектрика на π при переходе его толщины через значение $\lambda_0 \varepsilon^{-1/2} / (2 \sin \theta')$.

Семейство резонансных кривых, аналогичное рис. 2, для случая полупрозрачного волновода ($a/\lambda_0 = 0,2$; $U = 1,113$; $\theta = 108,3^\circ$) приведено на рис. 4. Так же, как и для рис. 2, $l = 0,7\lambda_0$, $d = 0,2\lambda_0$. Конечный коэффициент отражения от боковой поверхности диэлектрического волновода существенно видоизменяет все кривые семейства. При различных соотношениях Δ/λ_0 изменяется как добротность резонанса, так и его положение на оси h/λ_0 : от $h = 0,13\lambda_0$ для $\Delta/\lambda_0 = 0,9$ до $h = 0,2\lambda_0$ для $\Delta/\lambda_0 = 0,6$. Такое поведение резонансов затрудняет выбор глубины канавки в элементах дифракционного ввода-вывода энергии, тем более что наблюдаются области крайнего сгущения и разреженного положения скатов кривых.

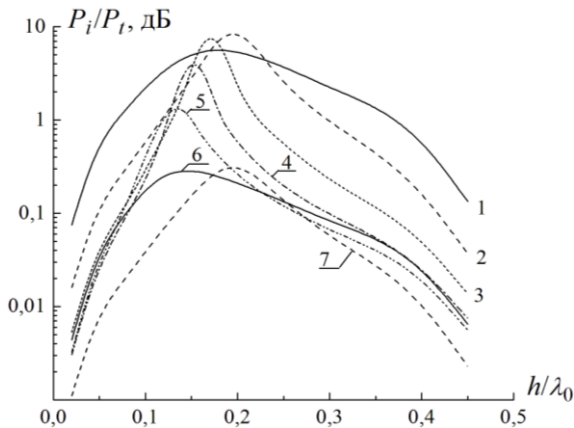


Рис. 4. Зависимость отбора мощности в системе от глубины канавок дифракционной решетки для полупрозрачного диэлектрического волновода: 1 – $\Delta/\lambda_0 = 0,5$; 2 – $\Delta/\lambda_0 = 0,6$; 3 – $\Delta/\lambda_0 = 0,7$; 4 – $\Delta/\lambda_0 = 0,8$; 5 – $\Delta/\lambda_0 = 0,9$; 6 – $\Delta/\lambda_0 = 1,0$; 7 – $\Delta/\lambda_0 = 1,1$

Из общих закономерностей поведения зависимостей на рис. 4 можно выделить одинаковую форму кривых при изменении параметра Δ/λ_0 на 0,5, например, при $\Delta/\lambda_0 = 0,5$ и $\Delta/\lambda_0 = 1,0$, при $\Delta/\lambda_0 = 0,6$ и $\Delta/\lambda_0 = 1,1$ и т. д. Это соответствует увеличению количества максимумов стоячей волны в пространстве волновод – решетка по координате x на единицу. Другие пары кривых не показаны по причине крайней насыщенности рисунка. Одинаковая форма резонансных кривых при расстояниях волновод – решетка, отличающихся на половину длины волны, свидетельствует об одинаковых условиях возбуждения откры-

того резонатора, образованного полупрозрачным слоем диэлектрика и гребенкой. Полная идентичность пар кривых не наблюдается из-за ограниченной длины дифракционной решетки.

После совместного рассмотрения семейств на рис. 2 и 4 можно считать установленным факт обратного влияния отраженной волны от слоя диэлектрика на эффективность преобразования поверхностной волны в объемную. Далее идентичность кривых на рис. 2 дает право утверждать, что объемная волна формируется дифракционной решеткой на расстояниях $\Delta/\lambda_0 = 0,2$ и более, и если факт существования полностью сформированной объемной волны при $\Delta = 10\lambda_0$ и даже $\Delta = \lambda_0$ не вызывает сомнений, то утверждение о проявлении всех существенных свойств объемной волны при $\Delta = 0,2\lambda_0$ можно считать достаточно необычным.

4. Влияние ширины канавки и периода гребенки на добротность резонансных кривых. Определим влияние ширины канавки и периода гребенки на параметры резонансной кривой. Зависимость эффективности преобразования от параметра h/λ_0 для различных ширинок канавок d/λ_0 представлена на рис. 5.

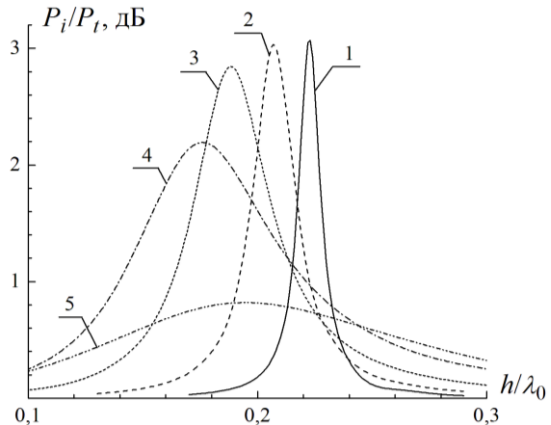


Рис. 5. Семейство резонансных кривых для гребенок с различной шириной канавок: 1 – $d/\lambda_0 = 0,025$; 2 – $d/\lambda_0 = 0,05$; 3 – $d/\lambda_0 = 0,1$; 4 – $d/\lambda_0 = 0,2$; 5 – $d/\lambda_0 = 0,4$

Рассмотрен случай прозрачного диэлектрического волновода ($a/\lambda_0 = 0,288$) для исключения влияния изученных выше эффектов на предполагаемые характеристики системы. Выбран случай средней связи $\Delta/\lambda_0 = 0,5$ при $l/\lambda_0 = 0,7$. Добротность резонансных кривых растет с уменьшением ширины канавки, так как при этом ухудшаются условия согласования плоскопараллельного металлического волновода, образованного канавкой в гребенке, на основной TEM волне со свободным пространством. Вместе с этим максимум резонансной кривой смещается в сторону больших значений h и стремится к своему пределу $h = 0,25\lambda_0$. Необычным в поведении зави-

симостей является достаточно быстрый выход максимума на насыщение вблизи уровня 3 дБ. Действительно, увеличение добротности резонансных колебаний в канавках в несколько раз должно было бы приводить к аналогичному увеличению эффективности преобразования. Вместо этого эффективность преобразования приближается к своему предельному значению 3, уже при $d = 0,1\lambda_0$.

Кривая 5 на рис. 5 иллюстрирует практически полную потерю резонансных свойств единичных излучателей – канавок при $d/\lambda_0 = 0,4$ вместе с потерей максимальной эффективности. Таким образом, при ограниченном числе элементарных излучателей целесообразно применять гребенки с шириной канавки $d \leq 0,3\lambda_0$.

Корректный выбор ширины канавки может эффективно влиять на широкополосность излучающей системы. Две встречно включенные системы диэлектрический волновод – решетка (одна – на излучение, а вторая – на прием) могут рассматриваться как полосовой фильтр, в котором ширина канавки гребенки или некоторый закон ее изменения задает полосу пропускания системы. Подобная система из двух встречно включенных излучателя и приемника была применена в доплеровском преобразователе частоты [7], ее оптимизация представляется крайне актуальной и в настоящее время.

Влияние периода гребенки на эффективность преобразования поверхностной волны в объемную иллюстрируется рис. 6 и 7. Рис. 6 относится к случаю двадцати излучающих элементов, рис. 7 – к длине решетки, равной двадцати длинам волн.

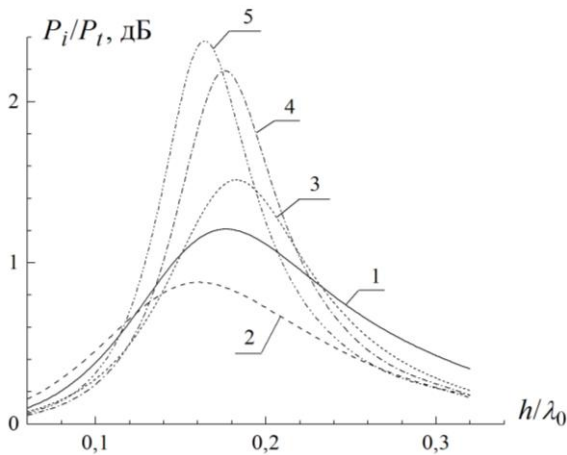


Рис. 6. Резонансные кривые для гребенок с различными значениями периода, вариант двадцати излучающих элементов ($N = 20$): 1 – $l/\lambda_0 = \infty$; 2 – $l/\lambda_0 = 0,5$; 3 – $l/\lambda_0 = 0,6$; 4 – $l/\lambda_0 = 0,7$; 5 – $l/\lambda_0 = 0,8$

Как и в предыдущем случае, рассматривается прозрачный диэлектрический волновод

$a/\lambda_0 = 0,288$ при $\Delta/\lambda_0 = 0,5$. Ширина канавки равна $d = 0,2\lambda_0$. Физические особенности взаимодействия медленной поверхностной волны с решетками с различными периодами иллюстрируется рис. 6. Период решеток варьируется от $l = 0,5\lambda_0$ ($\theta = 137,8^\circ$) до $l = 0,8\lambda_0$ ($\theta = 89,87^\circ$). Большие величины периодов не рассматриваются из-за появления второго луча в диаграмме направленности за счет перехода минус второй пространственной гармоники решетки из класса поверхностных в объемные. Случай $l/\lambda_0 = \infty$ соответствует двадцати невзаимодействующим канавкам или двадцатикратной эффективности одной канавки. Легко заметить, что добротность резонансов для системы канавок может как превышать, так и быть меньше добротности резонансной кривой для одной канавки. Сказанное относится в равной степени и к максимальной эффективности. Таким образом, период решетки выступает в роли регулятора коэффициента связи между резонаторами-канавками. Механизм взаимодействия отдельных излучателей можно разделить на два фактора: изменение разности фаз возбуждающего поля на апертуре смежных щелей при изменении периода и изменение фаз и амплитуд волн от соседних щелей, пришедших к выбранной. В результате происходит смещение резонанса по оси h/λ_0 в пределах $0,16 \div 0,18$. Максимальная эффективность отбора мощности решеткой из двадцати излучающих элементов также варьируется в достаточно больших пределах: от 0,88 дБ при $l/\lambda_0 = 0,5$ до 2,35 дБ при $l/\lambda_0 = 0,8$.

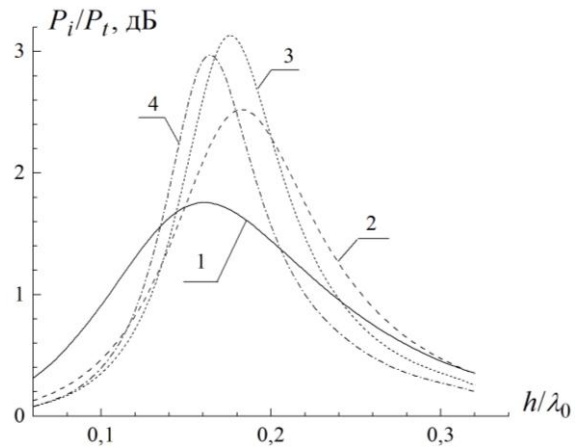


Рис. 7. Резонансные кривые для гребенок с различными значениями периода, вариант фиксированной длины решетки ($L = 20\lambda_0$): 1 – $l/\lambda_0 = 0,5$; 2 – $l/\lambda_0 = 0,6$; 3 – $l/\lambda_0 = 0,7$; 4 – $l/\lambda_0 = 0,8$

Выделение отдельного случая $L = 20\lambda_0$ (рис. 7) имеет значение при сравнении излучательной способности гребенок одинаковой длины. Вариант такого представления результатов имеет больший практический интерес, поскольку при заданной апертуре позволяет подобрать не-

обходимую решетку. В отличие от решеток с фиксированным числом излучающих элементов (рис. 6) решетки с заданной длиной обладают значительно меньшими колебаниями максимальной эффективности: от 1,76 дБ для $l/\lambda_0 = 0,5$ до 3,1 дБ для $l/\lambda_0 = 0,7$. При изменении периода решетки от $l = 0,6\lambda_0$ до $0,8\lambda_0$ максимальная эффективность колеблется совсем незначительно, что свидетельствует о возможности построения сканирующих излучающих систем со сменными решетками. Дополнительным параметром для выравнивания эффективности различных решеток может служить ширина канавок d в соответствии с рис. 5.

5. Особенности преобразования медленных поверхностных волн в объемные при выполнении условия Брюстера. Практическое использование излучающей системы диэлектрический волновод – решетка предполагает наличие простых и однозначных зависимостей эффективности отбора мощности от параметров структуры. Одним из таких условий является прозрачность диэлектрического волновода. Среди возможных способов обеспечения прозрачности можно назвать исследованный выше выбор резонансной толщины диэлектрического волновода, выбор малой диэлектрической проницаемости материала волновода, в том числе за счет пористости, просветление двух поверхностей диэлектрического волновода известными методами из оптики и радиооптики, а также использование эффекта Брюстера. Последний способ самый простой для реализации, так как не требует каких-либо новых материалов или технологий. В нашем случае поляризация падающей на слой диэлектрика волны от решетки соответствует необходимой, и единственным дополнительным условием будет выбор периода решетки для каждого значения коэффициента замедления, а следовательно, и толщины диэлектрического волновода.

Угол Брюстера, определенный в оптике, для величины диэлектрической проницаемости $\epsilon = 3$ равен 60° , что соответствует $\theta_B = 150^\circ$. Зависимости ослабления прошедшей мощности в системе от расстояния волновод – решетка представлены на рис. 8 для всех значений толщины диэлектрического волновода, присутствующих на рис. 3. Величина периода принимает значения $l = 0,505\lambda_0$ для $a/\lambda_0 = 0,2$; $l = 0,487\lambda_0$ для $a/\lambda_0 = 0,25$; $l = 0,472$ для $a/\lambda_0 = 0,288$; $l = 0,451\lambda_0$ для $a/\lambda_0 = 0,35$; $l = 0,438\lambda_0$ для $a/\lambda_0 = 0,4$. Ширина канавки составляет $d = 0,2\lambda_0$, глубина $d = 0,18\lambda_0$. Сравнение зависимостей, изображенных на рис. 3 и 8, показывает, что в отличие от варианта резонансной толщины диэлектрического волновода в случае эффекта Брюстера осцилляции коэффициента прохождения подавлены для всех диэлектрических волноводов различной толщины. Дей-

ствительно, если коэффициент отражения волны от границы воздух – диэлектрик равен нулю, то толщина слоя диэлектрика уже никак не влияет на общий коэффициент отражения слоя. Этот эффект будет полезным в том случае, когда в силу каких-либо причин толщина диэлектрического волновода в системе задана, а прозрачность необходимо обеспечить альтернативным способом. Некоторым ограничением практического применения диэлектрического волновода с эффектом Брюстера может оказаться слишком большое отклонение луча диаграммы направленности от нормали к апертуре, тем не менее, не исключен вариант применения материалов с большой величиной диэлектрической проницаемости. При встречном включении двух излучающих систем, как, например, в работе [6], большой наклон луча наоборот является преимуществом.

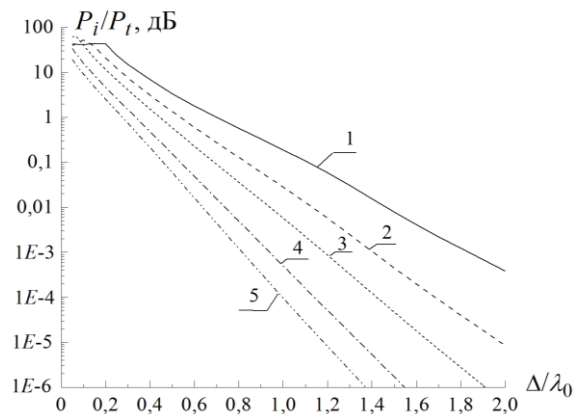


Рис. 8. Зависимость отбора мощности в системе от расстояния волновод – решетка (при выполнении условия Брюстера): 1 – $a/\lambda_0 = 0,2$; 2 – $a/\lambda_0 = 0,25$; 3 – $a/\lambda_0 = 0,288$; 4 – $a/\lambda_0 = 0,35$; 5 – $a/\lambda_0 = 0,4$

Зависимости, изображенные на рис. 8, во всех основных особенностях за исключением осцилляций повторяют рис. 3. Наблюдается аналогичное ограничение максимального отбора мощности при малом расстоянии волновод – решетка, причем у кривой 1 с минимальным коэффициентом замедления появилась плоская вершина. Это еще раз говорит о других механизмах передачи энергии от входного участка волновода к выходному помимо основной волноводной моды.

Наличие незначительных осцилляций на кривых 1-3 (рис. 8) при малых расстояниях волновод – решетка иллюстрирует еще одно физическое явление в системе. Если проследить поведение положения максимума диаграммы направленности от величины расстояния волновод – решетка (рис. 9), то обнаружится достаточно сильное влияние решетки на коэффициент замедления диэлектрического волновода, в результате которого луч отклоняется от $\theta_B = 150^\circ$. Отклоне-

ние луча от θ_B , в свою очередь, приводит к появлению конечного коэффициента отражения от слоя диэлектрика и к осцилляциям отбора мощности. Характерным является тот факт, что более толстые диэлектрические волноводы обладают значительно большей устойчивостью к внешним воздействиям, чем тонкие. В любом случае режим малых расстояний волновод – решетка следует использовать с осторожностью и обязательно контролировать фазовые искажения в системе.

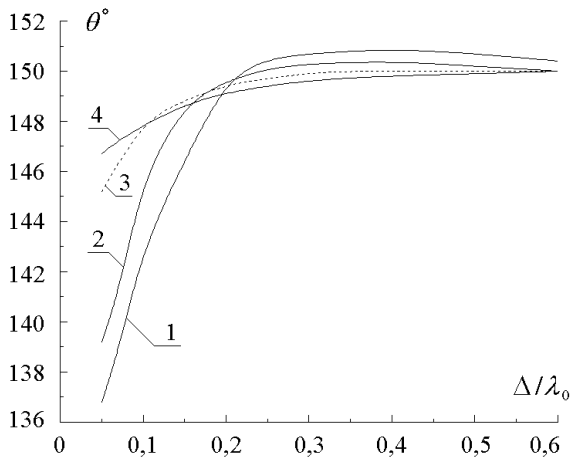


Рис. 9. Зависимость положения максимума диаграммы направленности излучающей системы от расстояния волновод – решетка (при выполнении условия Брюстера): 1 – $a/\lambda_0 = 0,2$; 2 – $a/\lambda_0 = 0,25$; 3 – $a/\lambda_0 = 0,288$; 4 – $a/\lambda_0 = 0,35$

Выводы. Проведенные исследования явления преобразования медленных поверхностных волн планарного диэлектрического волновода в объемные выявили ряд резонансных эффектов, связанных как с каждым элементом структуры в отдельности, так и с взаимным их расположением. Проведена классификация видов резонансов, среди которых новыми, до сих пор не изученными были резонансы по толщине диэлектрического волновода и по расстоянию волновод – решетка.

Использованная строгая математическая модель излучателя, состоящего из диэлектрического волновода над решеткой конечных размеров, достоверно описывает все без исключения физические явления в системе, которые наблюдаются экспериментально.

Исследования преобразования медленных поверхностных волн в объемные дают право утверждать, что подобные резонансные явления должны наблюдаться в излучающих системах с произвольным сечением диэлектрического волновода и дифракционными решетками других видов: ленточными, в том числе расположенными на дополнительных диэлектрических подложках, решетками из круглых брусьев, двумерно-

периодическими решетками и т. д. Изучение этих резонансов является необходимым этапом практического применения предполагаемой структуры и по возможности должно проводиться строгими математическими методами.

1. Шестопалов В. П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники: в 2-х т. – Киев: Наук. думка, 1985. – Т. 1. – 213 с.
2. Евдокимов А. П., Крыжановский В. В. Новое направление в технике антенных решеток // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1996. – 39, № 9/10. – С. 54-61.
3. Стешенко С. А., Кириленко А. А. Строгая двумерная модель эффекта преобразования поверхностных волн в объемные // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2005. – 10, № 1. – С. 30-38.
4. Jackson D. R., Oliner A. A. and Ip A. Leaky-Wave Propagation and Radiation for a Narrow-Beam Multiple-Layer Dielectric Structure // IEEE Trans. Antennas and Propagation. – 1993. – 41, No. 3. – P. 344-348.
5. Шестопалов В. П. Дифракционная электроника. – Харьков: Вища школа, 1976. – 232 с.
6. Тамир Т. Интегральная оптика. – М.: Мир, 1978. – 344 с.
7. Крыжановский В. В., Шестопалов В. П. Фазометр миллиметрового диапазона с вращающейся решеткой // Приборы и техн. эксперимента. – 1986. – № 3. – С. 153-154.

RESONANT PROPERTIES OF PLANAR DIELECTRIC WAVEGUIDE – LAMELLAR GRATING SYSTEM

V. V. Kryzhanovskiy, S. V. Kryzhanovskiy,
S. O. Steshenko, O. V. Chistyakova

The resonant properties of planar dielectric waveguide – lamellar grating system have been investigated numerically. The classification of different kinds of resonances, which appear with a change of the system parameters including the groove sizes, the dielectric waveguide thickness and the distance between the waveguide and the grating, is accomplished. Some practically useful recommendations regarding the choice of the waveguide and grating parameters in antennas applications are given.

Key words: millimeter waves, diffraction grating, planar dielectric waveguide.

РЕЗОНАНСНІ ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМИ ПЛАНАРНИЙ ДІЕЛЕКТРИЧНИЙ ХВИЛЕВІД – ГРЕБІНКА

В. В. Крижановський, С. В. Крижановський,
С. О. Стешенко, О. В. Чистякова

Чисельно досліджено резонансні властивості системи планарний діелектричний хвилевід – гребінка. Виконано класифікацію видів резонансів, що виникають при зміні параметрів системи, включаючи розміри канавок, товщину діелектричного хвилеводу і відстань між хвилеводом і гребінкою. Наведено ряд практично корисних рекомендацій з вибору параметрів хвилеводу і решітки при створенні антен.

Ключові слова: міліметрові хвилі, дифракційні решітки, планарний діелектричний хвилевід.

Рукопись поступила 1 сентября 2008 г.