

Экспериментальное исследование распространения и излучения электромагнитных волн в модифицированной металло-диэлектрической структуре

Д. В. Майборода, С. А. Погарский, И. И. Сапрыкин

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина
E-mail: Sergey.A.Pogarsky@univer.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2006 г.

Исследованы волноведущие свойства модифицированной металло-диэлектрической структуры. Существенным параметром структуры является величина соотношения между диэлектрическими проницаемостями ее элементов. Особое внимание уделено изучению излучения и распространения электромагнитных волн, оптимальному возбуждению структуры. Полученные экспериментальные данные позволяют прогнозировать создание целого ряда функциональных элементов и устройств с высокими эксплуатационными характеристиками.

Введение

Металло-диэлектрические структуры (МДС) находят широкое применение в технике крайне высоких частот в качестве волноведущих систем и в качестве базовых структур при создании ряда функциональных элементов и устройств [1-5]. В настоящее время интерес к исследованию МДС постоянно повышается. Это объясняется по крайней мере двумя причинами. Во-первых, появлением новых типов диэлектрических материалов с малым уровнем затухания в мм диапазоне и пониженным уровнем требований к точности изготовления элементов конструкций. Во-вторых, развитием методов вычислительной математики и появлением эффективного программного обеспечения, позволяющего осуществлять моделирование электродинамических характеристик МДС.

В недалеком прошлом большинство эффективных конструкций, таких, как частотно-селективные устройства [6, 7] и антен-

ны [8, 9], создавалось на основе одной из модификаций МДС – изолированном зеркальном диэлектрическом волноводе (ИЗДВ). Хорошо известно, что конструкции, базирующиеся на ИЗДВ, имеют одну характерную особенность. Она состоит в ограничениях, накладываемых на геометрические размеры функциональных элементов (например, излучающих), их ориентацию и местоположение относительно базового элемента – диэлектрического стержня, вследствие того, что базовый элемент сам по себе обладает весьма малыми геометрическими размерами. Альтернативой конструкций на основе ИЗДВ могут выступать устройства, в которых функциональный элемент располагается не на гранях диэлектрического стержня, а на вспомогательных плоскостях либо в металлических экранирующих плоскостях. Такие конструктивные решения приводят к принципиальным изменениям характера волнового процесса в самой МДС.

В связи с этим основными целями исследования явились: 1) доказательство возможности поддержания направленного распространения энергии электромагнитных волн с относительно малым уровнем потерь в модифицированной металло-диэлектрической структуре (ММДС), у которой соотношения диэлектрических констант и геометрических размеров основных элементов конструкции отличаются от соотношений этих параметров у ИЗДВ; 2) исследование излучения из такой структуры при наличии квазипериодической последовательности неоднородностей в виде поперечных щелей в металлизированном основании.

1. Волноведущие свойства ММДС

Рассмотрим ММДС, поперечное сечение которой приведено на рис. 1. Экспериментально исследовался макет со следующими параметрами: $t = 0.5$ мм – толщина подложки; $d = w = 2$ мм – размеры диэлектрического стержня; $\epsilon_1 = 2.62$, $\epsilon_2 = 9.6$ – диэлектрические проницаемости стержня и подложки соответственно.

Существенным отличием рассматриваемой структуры от ИЗДВ является измененное соотношение между диэлектрическими проницаемостями подложки и диэлектрического стержня ($\epsilon_2/\epsilon_1 > 1$ у ММДС и $\epsilon_2/\epsilon_1 < 1$ у ИЗДВ) и измененное соотношение между толщиной диэлектрической подложки и толщиной диэлектрического

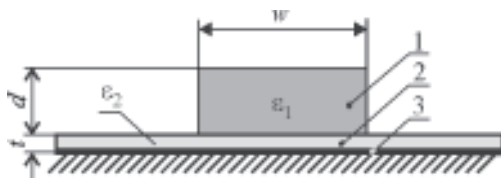


Рис. 1. Внешний вид поперечного сечения структуры: 1 – диэлектрический стержень, 2 – диэлектрическая подложка, 3 – металлизированное основание

стержня ($t/d \approx 0.125$ у ММДС и $t/d \approx 0.01$ у ИЗДВ). Несмотря на внешнее подобие рассматриваемой ММДС и структуры на ИЗДВ, распределения энергии между распространяющимися в них собственными волнами принципиально отличаются. Если в случае ИЗДВ основная часть энергии электромагнитной волны распространяется в диэлектрическом стержне в виде одной из собственных волн E_{11}^y или E_{11}^x и лишь небольшая часть энергии распространяется в диэлектрической подложке, то в рассматриваемой структуре, напротив, основная часть энергии распространяется в диэлектрической подложке в виде поверхностных волн (LM_0 -волн).

Хорошо известно [8], что спектр распространяющихся волн в любой МДС объемного формообразования является достаточно сложным. Выбор рабочей моды и определение рабочего частотного диапазона могут быть осуществлены как правило либо путем решения соответствующей граничной задачи, либо путем непосредственного численного моделирования с использованием систем автоматизированного проектирования. Альтернативным способом выбора рабочей моды и рабочего диапазона частот является использование экспериментальных дисперсионных характеристик. На рис. 2 представлены экспериментальные дисперсионные характеристики исследуемой структуры, полученные с использованием метода подвижного зонда.

Из приведенных дисперсионных кривых видно, что работа рассматриваемой ММДС в одномодовом режиме возможна лишь в относительно узких частотных диапазонах. Кривые 1, 2, соответствующие волнам E_{11}^y и E_{11}^x , характеризуют распространение и трансформацию этих мод. Как следует из рисунка, в некоторых дисперсионных характеристиках (кривые 1, 2) присутствуют две области, где $\lambda_g/\lambda_0 > 1$, в которых происходит трансформация медленных волн в быстрые (наблюдается излучение), и области, где $\lambda_g/\lambda_0 < 1$, в пределах которых происходит распространение медлен-

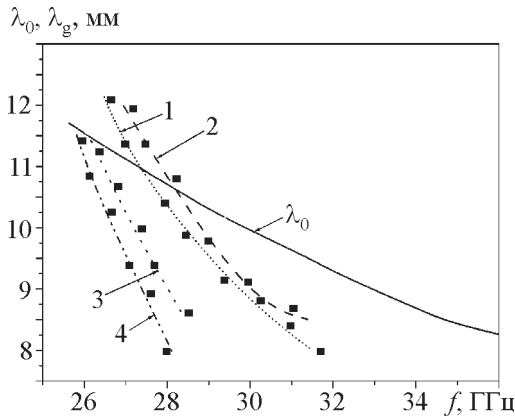


Рис. 2. Дисперсионные характеристики ММДС: кривые 1, 2 – дисперсионные характеристики волн E_{11}^y и E_{11}^x ; кривые 3, 4 – дисперсионные характеристики LM_n -волн; λ_0 – длина волны в свободном пространстве; λ_g – длина волны в ММДС

ных (собственных) волн внутри самого диэлектрического стержня. Кривые 3, 4 описывают процесс распространения медленных (поверхностных) волн в диэлектрической подложке. Для них характерно соотношение $\lambda_g/\lambda_0 < 1$.

Другим свидетельством того, что в структуре возможно возбуждение поверхностных волн, способных распространяться без существенного затухания (в отсутствие неоднородностей), в режиме, когда амплитуда полей поверхностной волны оказывается существенно больше амплитуды собственной волны диэлектрического стержня, является результат измерений амплитуд полей, проведенных в ближней зоне методом подвижного зонда. Измерения выполнены на двух частотах $f_1 = 26.78$ ГГц и $f_2 = 30.8$ ГГц. Результаты обработки экспериментальных массивов представлены в виде изолиний на рис. 3, а и 3, б. Очевидно, что в распределениях полей наблюдаются существенные различия. На частоте f_1 (рис. 3, а) электрическое поле на оси стержня имеет амплитуду по абсолютному значению близкую к половине максимальной амплитуды и остается примерно постоян-

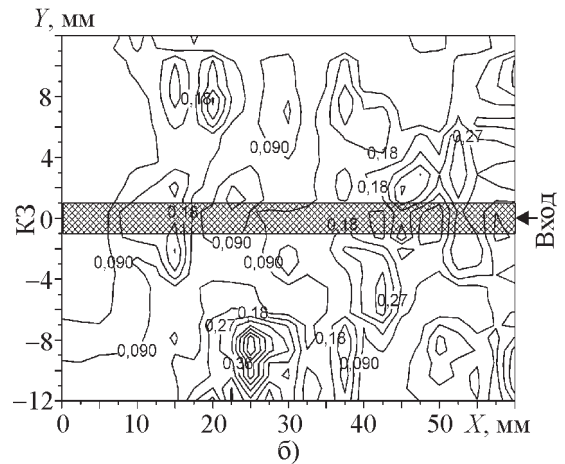
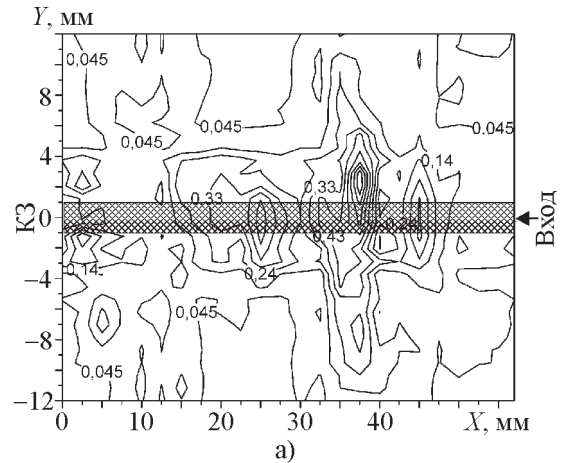


Рис. 3. Картина изолиний электрического поля ММДС: а) – результаты измерения на частоте $f_1 = 26.78$ ГГц, б) – на частоте $f = 30.8$ ГГц. Заштрихованная область – область диэлектрического стержня, КЗ – плоскость полного отражения, $Y = 0$ – ось диэлектрического стержня

ным (за исключением областей возбуждения и полного отражения). Вне стержня фиксируется амплитуда полей, которая по величине на порядок ниже, чем в самом стержне. На частоте f_2 характер распределения поля изменяется принципиальным образом. Максимумы интенсивности полей смещаются от оси стержня, что является доказательством возбуждения поверхностных волн. Расстояние между областями максимальной интенсивности полей, расположенными вдоль структуры с противоположных

от стержня сторон, позволяет экспериментально оценивать величину длины волны возбужденных волн.

Одним из существенных этапов проводимого исследования является изучение и отработка методов эффективного возбуждения такого рода структур. Максимальную эффективность и достаточную технологичность показал метод возбуждения стержня со скосами по высоте, выполненными под углом полного внутреннего отражения, которые вводились в подводящие волноводы на глубину, приблизительно равную длине волны в стержне λ_g . Погрешность выполнения скосов не должна превышать $\pm 2^\circ$. Проведенные исследования доказали, что эффективность возбуждения такой системы и незатухающий волновой процесс (затухание не более -0.35 дБ/см) со значением коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), не превышающим 1.58, возможны в полосе частот $25 \div 35$ ГГц.

2. Излучающая структура

Рассматриваемая ММДС может являться базовым элементом при проектировании излучающих систем. Определяющим при создании эффективных систем такого рода является фактор оптимального соотношения между геометрическими размерами, диэлектрическими константами элементов конструкции и длиной волны. Кроме того, важным обстоятельством с точки зрения конструирования является месторасположение неоднородностей – излучателей. Последнее достаточно актуально в связи с тем, что диэлектрическая проницаемость стержня оказывается меньшей диэлектрической проницаемости подложки, что приводит к ситуации, когда электромагнитное поле удается сконцентрировать вблизи стержня (в подложке) лишь на определенных частотах. Диэлектрический стержень в этом случае остается ключевым элементом конструкции, поскольку он реализует функцию трансформации основной волны металлического прямоугольного волново-

да в одну из мод диэлектрического волновода и функцию возбудителя поверхностных волн. При этом неоднородности в виде щелей, выполняющие роль излучателей, располагаются на металлизированной стороне подложки. Такое конструктивное решение позволяет устранить существующие ограничения, накладываемые на геометрические размеры неоднородностей и их взаимную ориентацию. На рис. 4 представлено схематическое изображение излучающей структуры на основе ММДС с периодическим расположением излучающих элементов. Щели расположены перпендикулярно к продольной оси диэлектрического стержня. Характерные размеры структуры: длина щели (l) и период следования щелей (L) – выбирались из соотношений $l/\lambda_g \approx 1$ и $L/\lambda_g \approx 1$. Эффективность работы такого рода излучающих систем может быть обеспечена путем оптимизации геометрических размеров и других параметров структуры и выбором амплитудно-фазового распределения на излучающих элементах (элементе). Целевой выбор геометрических размеров позволяет избежать (или максимально снизить) их влияния на угол отклонения главного лепестка диаграммы направленности от нормали к плоскости излучающей структуры. Хорошо известно, что излучатели с характерным размером, приближающимся к длине волны, демонстрируют меньшее отклонение главного лепестка диаграммы направленности от нормали, чем излучатели с другими размерами. В этой

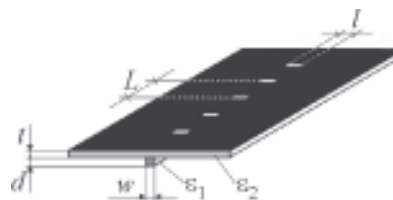


Рис. 4. Схематическое изображение излучающей структуры

связи на передний план выходит вопрос выбора рабочей моды и диапазона рабочих частот.

Расчет характеристик излучающего модуля на основе ММДС с одним излучающим элементом может быть выполнен на основе строгих решений, приведенных в работах [10, 11]. Периодичность расположения элементов может быть учтена посредством использования результатов работы [12], а характеристики излучения могут быть получены с учетом результатов работы [13].

Как и всякая излучающая система, такая структура может работать в режимах бегущих и стоячих волн. Режим стоячих волн оказывается более предпочтительным с точки зрения реализации требуемых амплитудно-волновых характеристик. Исследования зависимостей КСВН от частоты в заданном диапазоне в режиме короткого замыкания (КЗ) показали, что существуют участки диапазона с относительно низким уровнем КСВН. Следует ожидать, что эффект вытекания энергии электромагнитного поля будет наблюдаться именно на этих участках. На рис. 5 представлены экспериментальные диаграммы направленности структуры с пятью щелями. На рисунке при-

ведены четыре кривые, соответствующие измерениям амплитуд полей по обе стороны электродинамической структуры, выполненные на двух частотах $f_1 = 28.59$ ГГц и $f_2 = 33.2$ ГГц. Кривые 1 и 3 соответствуют характеристикам излучения со стороны диэлектрического стержня на частоте f_1 , а кривые 2 и 4 – с противоположной (металлизированной) стороны на частоте f_2 . Представленные результаты нормированы на абсолютный максимум амплитуд полей.

Как следует из графиков, излучение из структуры наблюдается с обеих сторон и на обеих частотах. Амплитуда излученных волн со стороны стержня оказывается существенно большей, чем амплитуда волн, излучаемых со стороны подложки. Это объясняется невысоким уровнем преобразования распространяющейся собственной волны диэлектрического волновода в поверхностную вследствие относительно малой толщины диэлектрической подложки по отношению к длине волны ($t/\lambda_g \approx 0.06$). По-видимому, выраженный эффект “втягивания” поля в область с большим значением диэлектрической проницаемости наблюдается при соотношениях $t/\lambda_g \approx 0.25 \div 0.5$, однако увеличение толщины подложки приводит к существенному росту диссипативных потерь.

Характерно, что в обоих случаях направления максимумов диаграммы направленности смещены относительно нормали к плоскости структуры. Это смещение оказывается тем меньше, чем меньше уровень КСВН в диапазоне рабочих частот. Минимальное смещение максимума диаграммы направленности от нормали составляет 1.5° на частоте f_1 и максимальное – приблизительно 10° на частоте f_2 . Ширина главного лепестка диаграммы направленности на частоте f_1 составляет 4.5° , на частоте f_2 она увеличивается до 8° . Влияние на количественное соотношение частей энергии, распространяющихся в стержне и в подложке, возможно оказывать с помощью дополнительных неоднородностей в виде металлических экранов, диэлектрических вставок и др., позволяющих реализовывать как за-

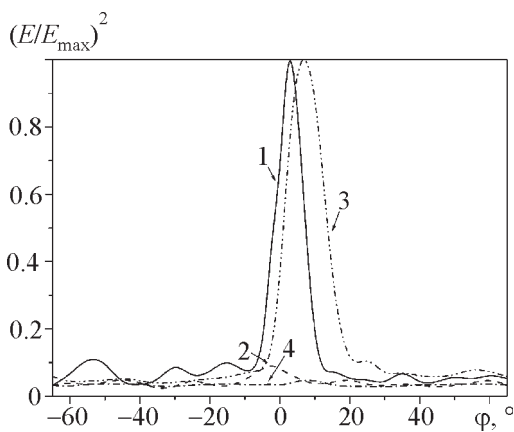


Рис. 5. Диаграммы направленности излучающей структуры: кривые 1, 3 – со стороны диэлектрического стержня на частоте $f_1 = 28.59$ ГГц; кривые 2, 4 – со стороны металлизированной подложки на частоте $f_2 = 33.2$ ГГц

данную форму диаграммы направленности, так и уровень излучения с обеих сторон структуры.

Существенным фактором при формировании заданной диаграммы направленности является взаимная ориентация продольных осей стержня и излучателя. На рис. 6 представлены результаты измерений диаграмм направленности со стороны стержня и со стороны подложки на частотах $f_1 = 28.59$ ГГц и $f_2 = 33.2$ ГГц при взаимной ориентации осей 45° .

Из графиков следует, что поворот осей относительно друг друга оказывает существенное влияние на характер волнового процесса в структуре. Во-первых, происходит заметное перераспределение мощности в стержне и подложке, что проявляется в повышении уровня излучения со стороны щелей (кривая 3 на частоте f_2). Во-вторых, главный лепесток диаграммы направленности со стороны стержня существенно отклоняется от нормали (кривая 1 на частоте f_1). При этом диаграммы направленности в обоих случаях оказываются многолепестковыми с заметной амплитудой боковых

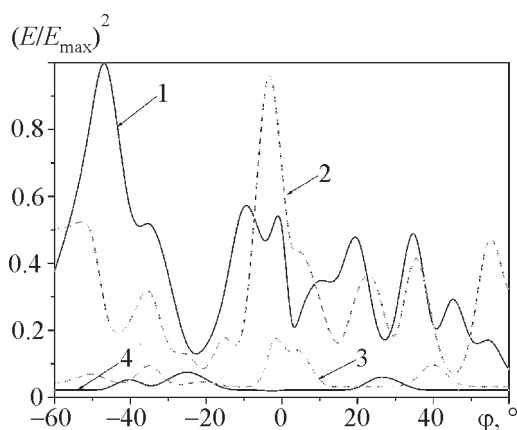


Рис. 6. Диаграммы направленности излучающей структуры при взаимной ориентации осей стержня и резонаторов 45° : кривые 1, 2 – со стороны стержня соответственно на частотах $f_1 = 28.59$ ГГц и $f_2 = 33.2$ ГГц; кривые 3, 4 – со стороны подложки соответственно на частотах $f_2 = 33.2$ ГГц и $f_1 = 28.59$ ГГц

лепестков. Многолепестковость не является существенным препятствием для реализации антенных систем с заданной формой диаграммы направленности. Известно большое число методов преодоления этого недостатка. В случае ММДС одним из простейших способов является введение в область распространения волны дополнительных неоднородностей в виде экранов, посредством которых возможно управлять спектральным составом распространяющихся в структуре волн.

Эффект качания диаграммы направленности при свипировании частоты может оказаться очень важным при создании управляемых излучающих систем.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования продемонстрировали возможность создания условий для устойчивого волнового процесса с направленной передачей энергии электромагнитных волн с относительно низким уровнем КСВН и затухания, и получения требуемого распределения полей в ММДС. Эти факторы позволяют прогнозировать создание высокоэффективных излучающих систем и других функциональных элементов мм диапазона волн с высоким уровнем функциональных характеристик. Такого рода устройства могут найти широкое применение в аэрокосмических и других многофункциональных системах.

Литература

1. Hondors D., Debye P. Elektromagnetische Wellen an dielertrischen Drahten // Ann. Ph. – 1910. – Vol. Bd32, No. 8. – P. 453-465.
2. Itoh T. Dielectric waveguide-type millimeter-wave integrated circuits // Infrared and Millimeter Waves. Vol. 4. / K.Button and J.Wiltse (Eds). – Academic: New York, 1981. – 354 p.
3. Knox R. M. Dielectric waveguide Microwave Integrated Circuits – An Overview // IEEE. Trans. Microwave Theory Tech. – 1976. – Vol. MTT-24, No. 11. – P. 961-969.

4. Itoh T. Open guiding structures for mm waves integrated circuits // *Microwave J.* – 1982. – No. 9. – P. 113-126.
5. Guglielmi M. and Jackson D.R. Broadside radiation from periodic leaky-wave antennas // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 1993. – Vol. AP-41, No. 1. – P. 31-37.
6. Nallo C. D, Frezza F., and Galli A. Full-wave modal analysis of arbitrary-shaped dielectric waveguides through an efficient boundary-element method formulation // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 1995. – Vol. MTT-43, No. 12. – P. 2982-2990.
7. Li D.-U. and Chang H.-C. An efficient full-vectorial finite element modal analysis of dielectric waveguides incorporating inhomogeneous element across dielectric discontinuities // *IEEE J. Quantum Electron.* – 2000. – Vol. 36, No. 11. – P. 1251-1261.
8. Boriskina S. V., Benson T. M., Sewell P., and Nosich A. I. Highly efficient full-vectorial integrated equation solution for the bend, leaky and complex modes of dielectric waveguides // *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.* – 2002. – Vol. 8, No. 6. – P. 1225-1232.
9. Kirk A. and Chang K. Integrated image-line steerable active antennas // *Int. J. Infrared Millimet. Waves.* – 1992. – Vol. 13, No. 6. – P. 841-851.
10. Pogarsky S. A. Diffraction of Natural Waves of an Isolated Mirror Dielectric Waveguide at a Semi-Infinite System of Microstrip Resonators // *Telecommunications and Radio Engineering.* – 1998. – Vol. 52, No. 6. – P. 29-35.
11. Pogarsky S. A. and Saprykin I. I. Resonant phenomena in hybrid structures // *Int. J. Infrared Millimet. Waves.* – 1994. – Vol. 15, No. 7. – P. 1325-1333.
12. Peng S. T., Tamir T. and Bertolli H. L. Theory of periodic dielectric waveguide // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 1975. – Vol. 23, No. 1. – P. 123-133.
13. Yamamoto M. and Itoh K. Resonant type leaky-wave antenna using image NDR guide // *Electron. Lett.* – 1999. – Vol. 35, No. 11. – P. 857-858.

Експериментальне дослідження поширення та випромінювання електромагнітних хвиль у модифікованій металодіелектричній структурі

**Д. В. Майборода, С. О. Погарський,
І. І. Саприкін**

Досліджено хвилевідні властивості модифікованої металодіелектричної структури. Істотним параметром структури є величина співвідношення між діелектричними проникностями її елементів. Особливої уваги приділено вивченню випромінювання та поширення електромагнітних хвиль, оптимальному збудженню структури. Отримані експериментальні дані дозволяють прогнозувати створення цілої низки функціональних елементів та пристроїв з високими експлуатаційними характеристиками.

**Experimentally Investigated
Electromagnetic Wave Propagation
and Radiation in a Modified
Metal-Dielectric Structure**

**D. V. Mayboroda, S. A. Pogarsky,
and I. I. Saprykin**

The waveguiding properties of a modified metal-dielectric structure have been investigated. Such a structure has a significant parameter being the ratio between its element dielectric constants. A special emphasis is attended to studying the electromagnetic wave radiation and propagation mechanism and the structure optimum excitation. The experimental data allow prediction of the possibility to design a variety of the functional elements with the high performance characteristics.