

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2018-29-08>

УДК 537.874

ИЗЛУЧАЮЩАЯ СТРУКТУРА НА ОСНОВЕ ИНВЕРТИРОВАННОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Д.В. Майборода, С.А. Погарский, Е.О. Смирнова

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4

E-mail: spogarsky@gmail.com

Поступила в редакцию 25 октября 2018 г.

Актуальность. Задача создания эффективных излучающих структур в миллиметровом диапазоне является одной из актуальных в современной технике СВЧ и КВЧ диапазонов. Использование различных гибридных металло-диэлектрических структур в этом диапазоне становится все более значимым за счет возможности возникновения в них определенных физических эффектов, которые являются невозможными в стандартных диэлектрических волноводах и структурах на их основе.

Цель работы. Экспериментально исследовать основные электродинамические характеристики гибридной металло-диэлектрической структуры, в том числе способы возбуждения структуры, способы согласования с внешними цепями, энергетические характеристики.

Материалы и методы. Гибридная металло-диэлектрическая структура базируется на обращенном диэлектрическом волноводе, который включает металлизированное основание, диэлектрический стержень из полистирола и дополнительную диэлектрическую пластину, выполненную из поликора. Вспомогательные излучающие элементы в виде стержней конечной длины с металлизированной гранью расположены с определенным периодом на дополнительной диэлектрической пластине. Исследования структуры электрического поля в ближней зоне выполнены методом подвижного зонда. Для визуализации структуры полей использован метод изолиний.

Результаты. Предложена конструкция гибридной излучающей структуры на основе инвертированного диэлектрического волновода с периодически расположенными дополнительными диэлектрическими стержнями прямоугольной формы. Были измерены диаграммы направленности в Н-плоскости в двух режимах: короткого замыкания и режиме бегущих волн. На основе исследования структуры электрического поля в ближней зоне был установлен характер взаимодействия распространяющейся в волноведущем стержне электромагнитной волны и степень возбуждения металлизированных частей дополнительных элементов конструкции. Установлена степень возбуждения поверхностной волны и возможности ее излучения. На основании этой информации возможна оценка установки экранирующих элементов и решения вопросов электромагнитной совместимости.

Выводы. В ходе исследования установлено, что предложенная гибридная металло-диэлектрическая структура может обеспечивать эффективное излучение в режиме бегущих волн с приемлемым уровнем прямых потерь. При этом структура может обеспечивать приемлемый уровень согласования с внешними цепями. Показана возможность формирования излучаемых полей с заданными характеристиками в различных режимах работы основного волноведущего тракта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инвертированный диэлектрический волновод, затухание, КСВН, метод подвижного зонда, диаграмма направленности

RADIATING STRUCTURE BASED ON INVERTED DIELECTRIC WAVEGUIDE WITH ADDITIONAL ELEMENTS

D.V. Mayboroda, S.A. Pogarsky, K.O. Smirnova

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background. Creation of effective radiating structures operating in millimeter range is one of the important directions in modern microwave technology. The use of different hybrid metal-dielectric structures for this range becomes increasingly significant because of possible occurrence of certain physical effects, which are impossible in standard dielectric waveguides and structures on their basis.

Objectives. Experimentally investigate the main electrodynamic characteristics of a hybrid metal-dielectric structure, including the ways of excitation and matching with external circuits, energy characteristics.

Materials and methods. Hybrid metal-dielectric structure is based on inverted dielectric waveguide, which contains metallized base, dielectric rod made of polystyrene and additional dielectric plate made of glass ceramics. Auxiliary radiating elements in the form of rods of finite length with metallized face are located at certain period on the additional dielectric plate. The near-field structure measurements are carried out through the moving probe method. The isoline method has been used for field structure visualization.

Results. The construction of a hybrid radiating structure based on inverted dielectric waveguide with periodically located additional rectangular dielectric rods. The radiation patterns have been measured in H-plane in two modes: short-circuit mode and travelling wave mode. Based on near-field structure measurements, the behavior of the electromagnetic wave propagating in the waveguiding rod and the degree of excitation of the metallized parts of additional structure elements are obtained. The degree of excitation of a surface wave and the possibility of its radiation are obtained. Based on this data, shielding elements insertion possibility and electromagnetic compatibility problem solution can be estimated.

Conclusions: The research has revealed possible effective radiation in travelling wave mode with acceptable direct loss, provided by proposed hybrid metal-dielectric structure. Moreover, the structure can provide an acceptable level of matching with external circuits. The possibility of radiated fields with specified characteristics formation in the short circuit and traveling wave modes is demonstrated.

KEY WORDS: inverted dielectric waveguide, attenuation, VSWR, moving probe method, radiation pattern.

ВИПРОМІНЮЮЧА СТРУКТУРА НА ОСНОВІ ІНВЕРТОВАНОГО ДІЕЛЕКТРИЧНОГО ХВИЛЕВОДУ З ДОДАТКОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Д.В. Майборода, С.О. Погарський, К.О. Смирнова

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

Актуальність. Створення ефективних випромінюючих структур у міліметровому діапазоні є одним з актуальних напрямків у сучасній техніці НВЧ та КВЧ діапазонів. Використання різноманітних гібридних метало-діелектричних структур у цьому діапазоні стає все більш поширеним за рахунок можливості виникнення в них певних фізичних ефектів, які є неможливими в стандартних діелектричних хвилеводах і структур на їх основі.

Мета роботи. Експериментально дослідити основні електродинамічні характеристики гібридної метало-діелектричної структури, зокрема способи збудження структури, узгодження із зовнішніми колами, енергетичні характеристики.

Матеріали та методи. Гібридна метало-діелектрична структура базується на інвертованому діелектричному хвилеводі, який містить металізовану основу, діелектричний стрижень з полістиролу та додаткову діелектричну пластину, виготовлену з полікору. Допоміжні випромінюючі елементи у вигляді стрижнів кінцевої довжини з металізованою гранню розташовані з певним періодом на додатковій діелектричній пластині. Дослідження структури електричного поля у ближній зоні виконано за допомогою методу рухомого зонда. Для візуалізації структури полів використано метод ізоляції.

Результати. Запропоновано конструкцію гібридної випромінюючої структури на основі інвертованого діелектричного хвилеводу з періодично розташованими додатковими діелектричними стрижнями прямокутної форми. Виміряно діаграми спрямованості у Н-площині у двох режимах: короткого замикання та у режимі біжучої хвилі. На основі дослідження структури електричного поля у ближній зоні встановлено характер взаємодії електромагнітної хвилі, яка поширюється в хвилевідному стрижні, і ступінь збудження металізованих частин додаткових елементів конструкції. Встановлено ступінь збудження поверхневої хвилі і можливості її випромінювання. На підставі цієї інформації можна оцінити можливість встановлення екранувальних елементів і вирішення питань електромагнітної сумісності.

Висновки. У результаті дослідження було встановлено, що запропонована гібридна метало-діелектрична структура може забезпечити ефективне випромінювання у режимі біжучої хвилі з прийнятним рівнем прямих втрат. Крім цього, структура може забезпечити прийнятний рівень узгодження із зовнішніми колами. Показано можливість формування випромінюючих полів із заданими характеристиками у різних режимах роботи основного хвилевідного тракту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: інвертований діелектричний хвилевід, загасання, КСХН, метод рухомого зонда, діаграма спрямованості

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается повышенный интерес к миллиметровому диапазону длин волн. В этом частотном диапазоне использование линий передач на основе диэлектрических структур приобретает все большее значение, поскольку растет спрос на такие приложения, как спутниковая связь, мобильная связь, радиосвязь, радиометрия, мобильные радиолокационные станции и аппаратура для дистанционного зондирования Земли. В низкочастотной части спектра миллиметровых волн от 30 до 40 ГГц использование микрополосковых линий, копланарных линий передачи в принципе возможно, но диссипативные потери этих линий имеют тенденцию к резкому увеличению с ростом рабочей частоты.

Основными элементами линий передачи на диэлектрических структурах являются: диэлектрические стержни, размещенные на заземляющем основании, диэлектрические пластины и дополнительные элементы, размещенные на диэлектрических пластинах. Обычно толщина каждой диэлектрической области, а также геометрические размеры элементов структуры сравнимы с рабочей длиной волны. Например, в диапазоне 80 ГГц, размер микрополосковой линии должен быть меньше чем одна десятая длины волны (0,2–0,4мм). По сравнению с обычными микрополосковыми линиями передачи на миллиметровых частотах геометрический размер диэлектрического волновода намного больше. В связи с этим в миллиметровом диапазоне длин волн находят применение линии передачи и устройства, базирующиеся на основе диэлектрических линий передачи. Среди которых в настоящее время широко

применяются инвертированные полосковые диэлектрические волноводы и инвертированные полосковые диэлектрические волноводы. На основе этих линий передачи возможно построение целого класса функциональных устройств, а именно: циркуляторы, фазовращатели, направленные ответвители, фазированные решетки и антенны и излучающие модули [1-8].

Такого рода диэлектрические структуры являются сложнокомпозиционными и состоят из диэлектрических образований различного формообразования (прямоугольных, круглых, квадратных). Любая модификация базовой линии передачи требует проведения ряда фундаментальных исследований, включающих в себя изучение возбуждаемого спектра собственных волн и соответствующих им структур полей, способов их возбуждения и ряд других. Именно эти вопросы приобретают особую актуальность при создании эффективных излучающих систем.

В данном исследовании особый акцент сделан на вопросах возбуждения модернизированного инвертированного диэлектрического волновода, согласования с подводящими трактами, влияния различных факторов на излучающие свойства структуры.

БАЗОВАЯ СТРУКТУРА

Будем рассматривать сложнокомпозиционную электродинамическую структуру, представленную на Рис. 1. Основу конструкции составляет обращенный диэлектрический волновод: на металлизированном основании (1) расположен диэлектрический стержень (2) с геометрическими размерами 7.0x3.05 мм, выполненный из полистирола с $\epsilon_r = 2.52$. Над диэлектрическим стержнем без зазора расположена диэлектрическая пластина из поликора (3) с геометрическими размерами 60x48 мм и $\epsilon_r = 9.6$. Дополнительные излучающие элементы в виде диэлектрических стержней (4) выполнены из поликора, с геометрическими размерами $a = 2$ мм, $b = 2$ мм, $l = 16$ мм, и расположены периодически с периодом L . Период варьировался в интервале от половины длины волны до длины волны в структуре с учетом фактора укорочения длины волны. Одна из сторон дополнительных диэлектрических стержней металлизирована, и эта сторона обращена к диэлектрической пластине.

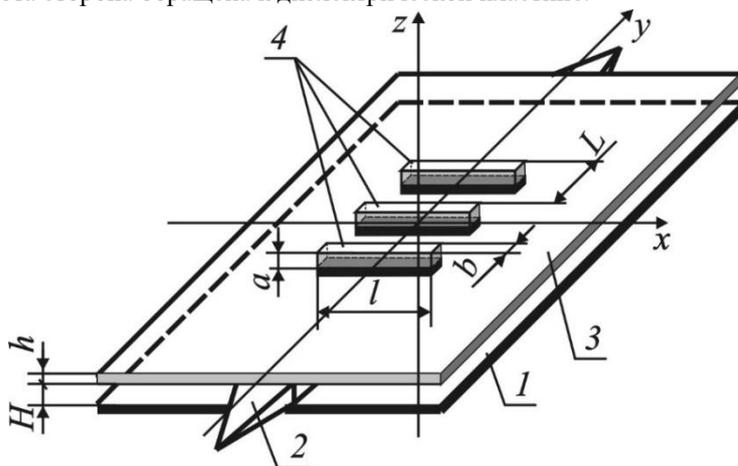


Рис. 1. Схематическое изображение структуры.

Для всех конструкций на основе диэлектрических волноводов одним из актуальных является вопрос о способе возбуждения одной из собственных волн. Наиболее оптимальным в настоящее время считается способ возбуждения базового диэлектрического стержня, реализуемый путем введения части стержня в возбуждающий прямоугольный волновод [9]. При этом важным оказывается форма оконечной части вводимого стержня и длина вводимой части стержня, вводимого в возбуждающий волновод. Путем ряда экспериментальных исследований установлено, что оптимальное возбуждение реализуется в тех случаях, когда оконечная часть стержня имеет скосы, выполненные под углом Брюстера [10]. В настоящем исследовании эти скосы реализованы в двух плоскостях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходной точкой исследования является изучение зависимостей прямых потерь и КСВН в рабочем частотном диапазоне. Сопоставление этих двух характеристик позволяет оценивать возможность эффективного излучения на выбранных частотах. На Рис. 2 приведены экспериментальные зависимости прямых потерь в диапазоне 25.5...33.5 ГГц для двух значений параметра L .

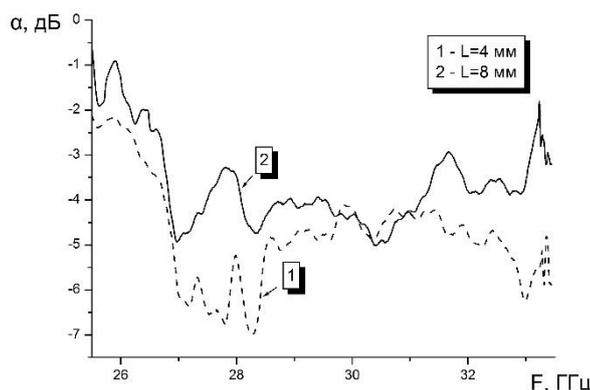


Рис. 2. Зависимость прямых потерь от частоты.

Анализ характеристик показывает, что в обеих зависимостях наблюдаются значительные скачки величины затухания. Минимальные значения затухания наблюдаются вблизи частоты $F = 25.7$ ГГц для обоих значений параметра L . Однако, эта частотная область не может быть использована в качестве рабочей по той причине, что в относительно узкой частотной полосе наблюдаются существенные перепады величины затухания (до -5 дБ). В характеристиках наблюдаются области со сравнительно небольшими перепадами значений затухания. Самая широкополосная из них оказывается в полосе частот 28.5...30 ГГц. Причем перепад значений затухания не превышает значения 0.5 дБ. Сопоставление обеих характеристик показывает, что расположение дополнительных диэлектрических стержней на расстоянии, равном длине волны в структуре, обеспечивает несколько меньшие прямые потери (до 1 дБ).

Второй важной характеристикой, которая предопределяет эффективный режим работы, является частотная зависимость КСВН. На Рис. 3 приведены экспериментальные зависимости КСВН от частоты для двух значений параметра L .

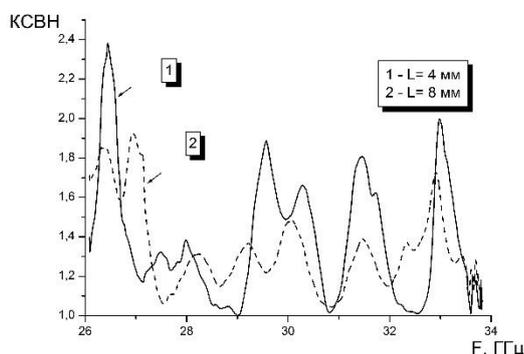


Рис. 3. Зависимости КСВН от частоты.

Очевидно, что в обоих случаях наблюдаются достаточно резкие изменения значений КСВН. Для значения $L = 4$ мм существуют частоты и даже относительно широкие области, в пределах которых наблюдается практически полное согласование структуры с внешними цепями. Так на частоте $F = 29.05$ ГГц значение КСВН равно 1.01, а интервале частот $\Delta F = 32.2...32.7$ ГГц значение КСВН не превышает уровень 1.05. При значении $L = 8$ мм уровень КСВН заметно выше, однако перепады значений КСВН оказываются существенно меньшими. Потенциально возможными рабочими областями можно считать частотные области, в пределах которых значения КСВН не превышают величину 1.3.

Достаточно важной с технологической точки зрения является информация о пространственном распределении полей в такой сложнокомпозиционной структуре. Важность такой информации определяется самой природой волноведущей структуры на основе диэлектрического волновода, а именно: возможность возникновения поверхностных волн, поляризационная неустойчивость собственных типов волн и др. Кроме того, реальная конструкция предполагает наличие различных вспомогательных конструктивных элементов (экранов, переходов и пр.), и взаимодействие этих элементов с электромагнитными полями могут существенным образом повлиять на характеристики устройства в целом. На Рис. 4 представлены пространственные распределения электрических полей в структурах с различными значениями параметра L . Рис. 4а соответствует значению параметра $L = 4$ мм, а Рис. 4б соответствует значению параметра $L = 8$ мм. Измерения выполнены в ближней зоне в режиме

короткого замыкания методом подвижного зонда на частоте $F = 27.3$ ГГц. Нормированное распределение полей представлено в виде изолиний электрического поля.

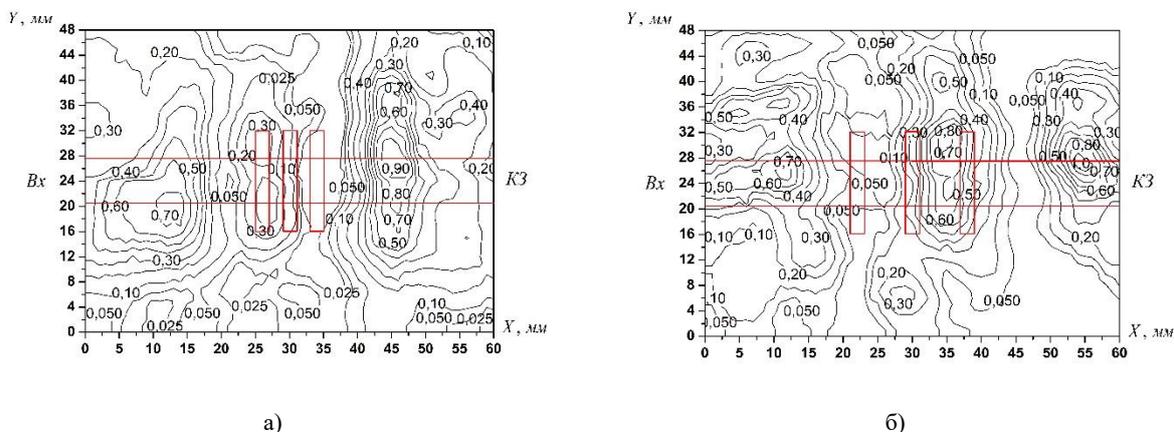


Рис. 4. Пространственные распределения полей на частоте $F = 27.3$ ГГц.

Сопоставление представленных распределений позволяет сделать следующие выводы. При расположении дополнительных стержней с периодом $L=4$ наблюдается сравнительно слабое взаимодействие стержней с электромагнитной волной (максимальная амплитуда порядка 0.3 вблизи первого стержня и 0.1 – вблизи третьего). Максимумы полей регистрировались практически симметрично относительно входа и короткозамыкателя на расстояниях приблизительно равных удвоенной длине волны в структуре. Отмечаются довольно высокие значения полей вблизи краев диэлектрической пластины, что свидетельствует о существовании поверхностной волны и возможного паразитного излучения этой волны. При расположении дополнительных стержней с периодом $L=8$ распределение полей достаточно сильно изменяется. Основная часть поля сконцентрирована вблизи волноведущего диэлектрического стержня. Поле концентрируется вблизи дополнительных стержней существенно больше (что в конечном итоге будет приводить к излучению). Амплитуда поверхностной волны вблизи краев подложки оказывается существенно меньшей, чем в первом случае, а, следовательно, уровень паразитного излучения будет меньшим.

Энергетические характеристики в виде диаграмм направленности в Н-плоскости были измерены в двух режимах: короткого замыкания и режиме бегущих волн (согласованной нагрузки) для двух значений параметра L на частоте $F = 29.57$ ГГц. На Рис. 5 приведены диаграммы направленности, измеренные в режиме короткого замыкания.

Диаграммы нормированы на глобальный максимум. Очевидно, что для обоих значений параметра L диаграммы являются многолепестковыми. Направление главного лепестка смещено от нормали на угол порядка 5° , что является проявлением определенного набега фазы для каждого из дополнительных стержней. Амплитуда излученной волны для значения параметра $L=8$ мм оказывается примерно в 5 раз большей, чем у структуры с периодом $L=4$ мм.

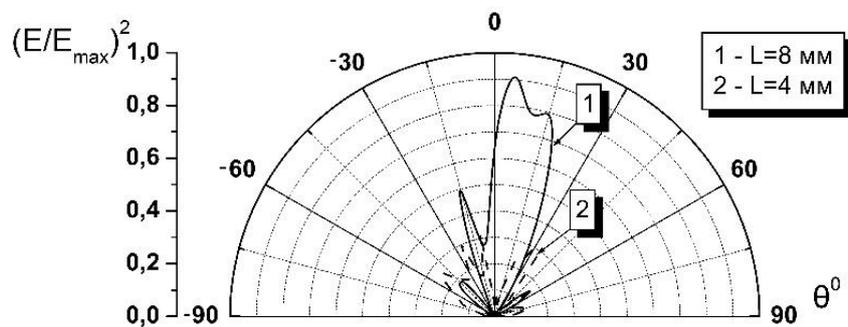


Рис. 5. Диаграммы направленности в режиме короткого замыкания.

На Рис. 6 приведены диаграммы направленности, измеренные в режиме бегущих волн (или согласованной нагрузки). Диаграммы нормированы на глобальный максимум.

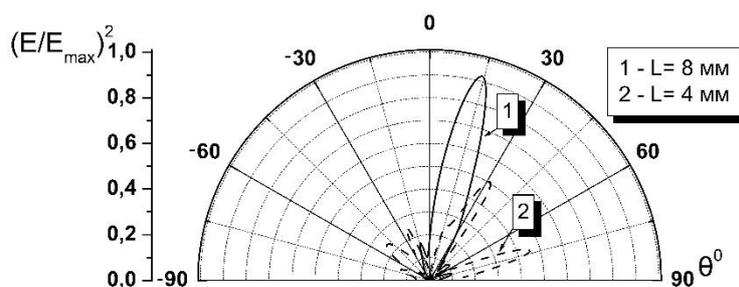


Рис. 6. Диаграммы направленности в режиме бегущих волн.

Как очевидно, при значении параметра $L = 4$ мм диаграмма оказалась многолепестковой без четко сформированных лепестков. При значении параметра $L = 4$ мм диаграмма становится практически однолепестковой, уровень боковых лепестков не превышает уровень 0.05 от главного. Направление главного лепестка смещено относительно нормали на угол 14.2° . Ширина главного лепестка по уровню 0.707 составляет 10.8° . Сопоставление уровней излучаемой мощности в абсолютных значениях для обоих режимов работы показывает, что уровень излучаемой мощности оказывается выше в режиме короткого замыкания. Вместе с тем, в таком режиме работы не удастся сформировать оптимальную форму диаграммы направленности при использовании небольшого количества дополнительных элементов.

ВЫВОДЫ

Задача создания эффективных излучающих структур в миллиметровом диапазоне является одной из актуальных в современной технике СВЧ и КВЧ диапазонов. В работе предложен вариант создания излучающей системы в КВЧ диапазоне на основе сложнопозиционной структуры. Экспериментально установлено, что такого рода структура позволяет решать основные задачи формирования излучаемых полей с заданными характеристиками. При этом структура отвечает достаточно жестким требованиям по параметрам вносимых прямых потерь и согласованию с внешними цепями.

Данная работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы, которая финансируется за счет средств государственного бюджета Министерством образования и науки Украины (номер бюджетной темы 0118U002038).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Authors' ORCID ID

Pogarsky, Sergey A.  <http://orcid.org/0000-0003-0833-1421>

Mayboroda D.V.  <http://orcid.org/0000-0002-9564-2369>

Kateryna Smirnova  <http://orcid.org/0000-0002-1572-7208>

REFERENCES

1. Crampagne R. Leaky wave antenna using an inverted strip dielectric waveguide / R. Crampagne, L. Padellec, A. Sarremejean // 10th European Microwave Conference. – 1980. – P. 474–479.
2. Itoh T. Inverted strip dielectric waveguide for millimetre-wave integrated circuits / T. Itoh // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1976. – Vol. MTT-24, № 11. – P. 821–827.
3. Rawat B. Computer aided design of inverted strip dielectric waveguide millimeter wave ring-resonator and coupler / S. Rawat, M. Dalmia // Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1984. – Vol. 5, № 12. – P. 1527–1542.
4. Li Z-W. A 61 GHz doppler radar using inverted strip dielectric waveguide / Z-W. Li, W. Menzel // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest – 1992. – P. 629–632.
5. Mayboroda D. V. The Radiating Unit Based on Hybrid Metal-Dielectric Structure with Bounded Sequence of Transverse Slots / Mayboroda D. V., Pogarsky S. A., Saprykin I. I. // Int. J. of Electromagnetics and Applications. – 2012. – Vol. 2, № 6. – P. 159–162.
6. Mayboroda D. V. The radiator of K_u -band based on inverted dielectric waveguide / D. V. Mayboroda, S. A. Pogarsky, I. I. Saprykin, S. V. Pshenichnaya // International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. – 2010. – P. 215–217.
7. Mayboroda D. V. A Leaky-wave antenna on the basis of an inverted dielectric waveguide / D. V. Mayboroda, S. A. Pogarsky // Telecommunications and Radio Engineering. – 2018. – Vol. 77, № 10. – P. 853–862.

8. Itoh T. Application of inverted strip dielectric waveguides for measurement of the dielectric constant of low-loss materials at millimeter-wave frequencies / T. Itoh, F.-J. Hsu // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1979. – Vol. 27, № 10. – P. 841 - 844.
9. Azarmanche M. N. Measurements of dispersion characteristics and field distributions in inverted strip dielectric waveguide in millimeter wavelength / M. N. Azarmanche, B. Chan Song Lint // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest – 1979*. – P. 208–210.
10. Ponchak G. E. Design and analysis of transitions from rectangular waveguide to layered dielectric waveguide / G. E. Ponchak, L. P. B. Katehi // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1996. – Vol. 44, № 7. – P. 1032–1040.