

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ ОГРАНИЧЕННОГО ПЛАНАРНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

С. А. Провалов, С. Д. Андренко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украины  
E-mail: [vigor@ire.kharkov.ua](mailto:vigor@ire.kharkov.ua)

Исследованы распределения полей (в поперечном и продольном направлениях) ограниченного планарного диэлектрического волновода. Результаты работы позволяют сделать вывод о пригодности электродинамической системы в виде ограниченного по ширине (ширина составляет несколько десятков длин волн) диэлектрического волновода как для возбуждения дифракционной решетки, так и для канализации электромагнитной энергии миллиметрового диапазона на расстояние более 200 длин волн. Ил. 10. Библиогр.: 13 назв.

**Ключевые слова:** диэлектрический волновод, длина волны, распределение поля, интерференция волн, возбудитель, зонд.

В СВЧ технике миллиметрового диапазона волн, как и в других диапазонах, вопросы, связанные с разработкой антенных систем занимают отдельное, весьма важное место. В основу разработок и конструкций закладываются как традиционные подходы, успешно зарекомендовавшие себя в более длинноволновых диапазонах, так и новые решения, не имеющие аналогов в ранее освоенных диапазонах. Одним из таких направлений в антенной технике миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн является использование явления преобразования поверхностных волн в объемные, наблюдаемое при дифракции неоднородных плоских волн на периодически расположенных рассеивателях [1, 2]. К настоящему времени на этой основе созданы антенные системы различного назначения: стационарные, бортовые, одно и многолучевые, сканирующие [3-8]. Общим признаком таких антенных систем, за редким исключением, является их принадлежность к линейным излучателям, когда поперечный размер собственно излучающей (приемной антенны-преобразователя) не превышает одну длину волны, а продольный (осевой) размер может варьироваться от десятков до сотен длин волн. Для повышения направленности излучения в поперечном измерении применялись классические приемы использования параболических зеркальных отражателей или линзовых корректоров из диэлектрика.

В то же время используемое явление преобразования поверхностных волн в объемные с помощью периодически расположенных рассеивателей может быть реализовано на рассеивателях любого поперечного размера – от единиц до сотен длин волн. Для этого необходимо создать требуемый источник падающего поля – носитель поверхностной волны. В образцах излучателей, для различных исследовательских целей и в образцах конкретных антенных систем для прикладных целей в качестве таких носителей используются диэлектрические волноводы (ДВ)

различного поперечного сечения – круглые, прямоугольные, гребневые, короткие отрезки планарных. Характерные размеры поперечного сечения линейных волноводов  $(0,5 \times 0,5) \lambda^2$ . Требуемый вид распределения поля поддерживается автоматически выбором рабочего типа колебания волновода. Очевидно, что поперечный размер собственно преобразователя также не превышает  $\sim 1 \lambda_0$ . Для того, чтобы получить поперечный размер преобразователя необходимой величины (обусловлено требованием к ширине формируемой направленности (ДН)) к примеру в интервале  $(10 \div 100) \lambda$  нужно применить ДВ, ширина которого обеспечит требуемую засветку дифракционной решетки, т. е. тех же размеров  $(10 \div 100) \lambda_0$ .

Использование таких ДВ продиктовано тем обстоятельством, что антенная система, работающая на эффекте преобразования поверхностных волн в объемные, обладает малой глубиной (размер, перпендикулярный к излучающему раскрытию). Размер по глубине определяется электродинамическими свойствами дифракционной решетки и связанным с ней ДВ и составляет не более  $3 \div 4$  длин волн практически при любой геометрии формируемой апертуры. Конструктивно такая антенная система может быть реализована в планарном исполнении. Наиболее близким к таким ДВ является планарный ДВ, который представляет собой диэлектрическую пластину бесконечной ширины [9]. При изучении распространения волн вдоль продольной оси пластины рассматривается ситуация, когда составляющие поля не зависят от поперечной координаты, совпадающей с бесконечным размером.

Определим геометрические параметры планарного ДВ следующим образом: длина  $L$  – вдоль продольной координаты  $Z$ , ширина –  $2b$  – по координате –  $Y$ , толщина –  $2a$  – по координате  $X$  и сформируем требования к геометрическим параметрам: толщина  $2a$  – выбирается из условия

существования только низшего колебания  $E$  или  $H$ -типа, длина и ширина ( $L \times 2a$ ) – тождественно совпадают с размерами формируемого излучающего раскрыва. Волновод, имеющий конкретную ширину, является ограниченным планарным диэлектрическим волноводом (ОПДВ).

Требования к амплитудно-фазовому распределению (АФР) поля в ОПДВ диктуются его целевым использованием в качестве основного элемента, с которого начинается формирование АФР излучающего раскрыва. Характерные особенности таких АФР в ОПДВ: в поперечном направлении – спадание амплитуды поля к краям и плоский фазовый фронт; в продольном направлении – равномерное амплитудное и линейное фазовое распределение, которое трансформируется решеткой в АФР излучающего раскрыва.

Таким образом, мы переходим от идеализированной задачи распространения волн в планарном ДВ к варианту распространения пучка в ограниченном слое ОПДВ. Подобные вопросы рассматриваются в квазиоптике при анализе открытых линий передачи. Там же вводится понятие длинных пучки, ширина которых много меньше длины и много больше длины волны.

Целью настоящего сообщения является представление результатов исследования возможности формирования в ОПДВ длинных квазиоптических пучков с заданными параметрами. Общее требование – это минимальные изменения распределения поля в поперечном сечении пучка на всей его длине  $L$ .

**1. Методика исследований.** Методика исследования амплитудных распределений полей в ОПДВ сводилась к следующему. Плоскость волновода располагалась горизонтально. Продольная ось волновода совпадает с осью  $Z$ . Ось  $X$  ориентирована по нормали к поверхности волновода, а ось  $Y$  – параллельна поверхности. Измерительный зонд (открытый конец полого металлического волновода нагруженный на детектор) устанавливался на подвижной каретке, осуществляющей перемещения в продольном и поперечном ( $OZ$  и  $OY$  соответственно) направлениях. Каретка находилась на оптической скамье. Измерялась  $E_z$  компонента электромагнитного поля диэлектрического волновода. Далее строились зависимости  $E_z=f_1(y)$  и  $E_z=f_2(Z)$  при постоянных значениях  $Z$  и  $Y$  соответственно. Амплитуда компоненты поля  $E_z$  во внешней области волновода с ростом координаты  $X$  убывает по экспоненциальному закону. В связи с этим для исключения погрешности измерений (или для её уменьшения) зонд выполнен плавающим по координате  $X$ , постоянно контактируя с поверхностью ОПДВ. При этом погрешности установки зонда удавалось сделать минимальными. Измерения выполнены на длине волны  $\lambda=8,33$  мм.

Для проведения измерений фазовых распределений в экспериментальный стенд вводились дополнительные элементы СВЧ схемы, что позволяло использовать методику измерения фазы, детально описанную в работе [10]. Диэлектрический волновод возбуждался рупорно-параболическим переходом, выполненным по схеме полусегментной параболической антенны [11]. Короткий параболический цилиндр и мало-размерный рупор (его апертура  $\sim 3\lambda$ ) закрыты металлическими пластинами таким образом, что поле заключено в области, ограниченной параллельными плоскостями, образующими двухплоскостной волновод. За счет выбора расстояния между плоскостями  $< \frac{\lambda}{2}$  в двухплоскостном вол-

новоме может распространяться только  $TEM$  волна. Выход рупорно-параболического перехода заканчивался согласующим рупором с раскрывом  $3\lambda$ , который и возбуждал исследуемый ОПДВ. Следовательно по способу возбуждения диэлектрический волновод возбуждался через его торец.

**2. Результаты исследования распределения полей ОПДВ.** Амплитудное распределение на выходе рупорно-параболического перехода представлено на рис. 1, а соответствующее ему фазовое распределение – на рис. 2. Приведенные распределения свидетельствуют о пригодности рупорно-параболического перехода в виде полусегментной антенны для возбуждения планарного диэлектрического волновода конечной ширины.

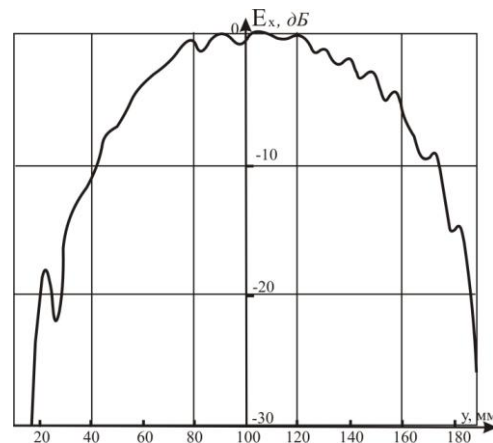


Рис. 1 Амплитудное распределение на выходном раскрыве возбуждателя

ОПДВ представляет собой пластину из полистирола ( $\epsilon=2,56$ ) толщиной  $2a=3,0$  мм, шириной  $2a=180$  мм при длине  $L=2000$  мм. Ширина волновода достаточно велика (более 20 длин волн), но тем не менее волновод ограничен по ширине. И именно эта ограниченность волновода поставила ряд проблем как физического, так и технического плана. Будучи возбужденным с тор-

ца спадающим к краям полем и с фазовым распределением, близким к синфазному, при распространении волнового пучка вдоль волновода имеет место дифракционная расходимость, при которой образующая пучка описывается гиперболой.

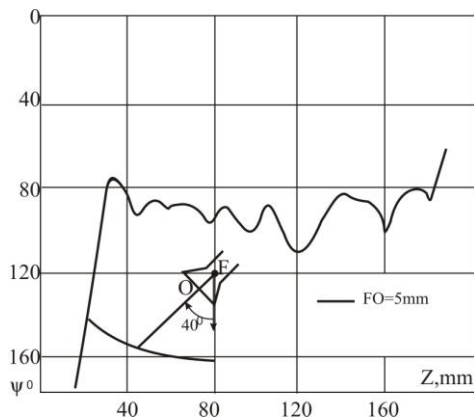


Рис. 2. Фазовое распределение на выходном раскрыве возбуждителя

Угол расходимости пучка  $\theta^\circ$  определяется по асимптотам гиперболы и зависит от соотношения длины волны к поперечному размеру пучка в начальной области [12]. В процессе распространения пучка по ОПДВ энергия, содержащаяся в периферийной части пучка, переотражается боковыми гранями пластины, а величина этой части энергии увеличивается при удалении от начальной области. Отраженная волна интерферирует с основной волной невозмущенной части пучка. В результате этого первичное амплитудно-фазовое распределение поля в процессе распространения волны в продольном направлении изменяется (см. рис. 3 сплошные линии). Волновод с такими амплитудными распределениями по координате  $OY$  не может быть использован для возбуждения дифракционной решетки и получения направленного излучения. Чтобы окончательно подтвердить отрицательное влияние отражений от краев ограниченного планарного волновода необходимо смоделировать ситуацию, при которой эти отражения исключены или существенно ослаблены. С этой целью возбуждатель ограниченного планарного волновода подключался к слою диэлектрика, выполненного из того же материала, что и планарный волновод (размеры листа  $60\lambda \times 120\lambda$ ). На рис. 3 точками представлены амплитудные распределения  $E_z(y)$  в слое на различных удалениях от плоскости возбуждения. Из анализа приведенных результатов видно, что распределения в ОПДВ претерпевают искажения по сравнению с распределением исходного волнового пучка уже на удалении от возбуждителя  $\sim 35$  длин волн, в то время как пучок в слое практически сохраняет свою форму на удалении более 100 длин волн.

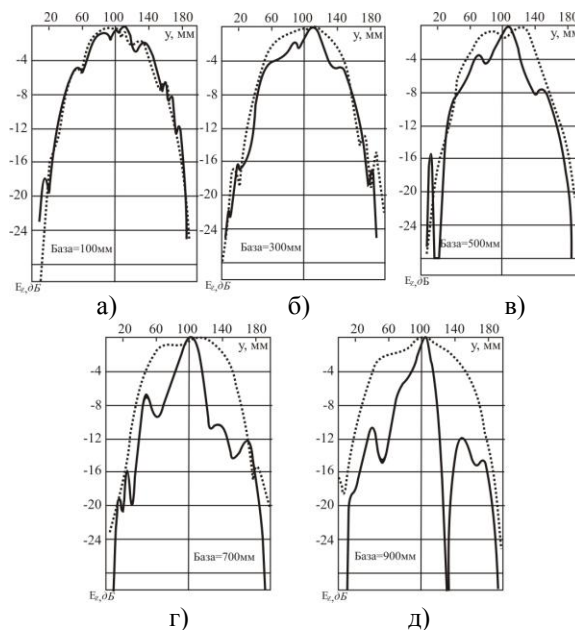


Рис. 3. Поперечные распределения поля в ОПДВ (сплошные линии) и в диэлектрическом листе (точечная кривая), снятые на различных расстояниях  $Z$  от возбуждителя: а)  $Z=100$  мм; б)  $Z=300$  мм; в)  $Z=500$  мм; г)  $Z=700$  мм; д)  $Z=900$  мм

Поведение ширины пучка на уровне  $-10$  дБ в диэлектрическом слое вдоль его длины представлено на рис. 4 (соответствует индексу  $R = \infty$ ). Видно, что в слое имеет место дифракционная расходимость (уширение пучка) при удалении от плоскости возбуждения. Следовательно, рассматриваемая система требует компенсации дифракционной расходимости. С этой целью необходимо изменить фазовое распределение на входном торце ОПДВ таким образом, чтобы горловина пучка приходилась, например, на середину апертуры, а начиная со середины волновой пучок начнет расширяться. При этом искажения волнового пучка за счет отражений от краев волновода будут минимальны.

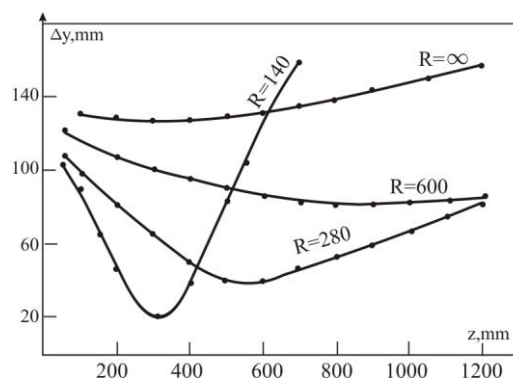


Рис. 4. Зависимость ширины пучка от продольной координаты для различных корректоров

Для формирования волнового пучка путем влияния на его расходимость воспользуемся

известным в оптике эффектом преломления пара-ксиального пучка на цилиндрической поверхности, разделяющей среды с различными показателями преломления ( $n_1, n_2$ ). Свойство такой границы описывается нулевым инвариантом Аббе [13]. Для случая падения плоской волны из свободного пространства на выпуклую боковую грань диэлектрического слоя ( $n_2 = n_{эфф}$ ) инвариант определяет фокус цилиндрической поверхности.

$$f = \frac{n_2 R}{n_2 - n_1} \quad (1)$$

где  $R$  – радиус кривизны границы раздела;  $f$  – фокусное расстояние.

В рассматриваемом примере сфокусируем пучок на середину длины волновода  $Z = L/2$ , что должно создать симметричные распределения в правой и левой частях волновода.

Таким образом, ОПДВ на входе должен иметь фазовый корректор, выполненный из того же материала, что и волновод, и имеющий необходимый радиус кривизны. На рис. 4 приведены экспериментально полученные зависимости ширины волнового пучка на уровне  $-10$  дБ в диэлектрическом слое вдоль его длины при различных радиусах корректора. Видно, что требуемый для волновода режим – получение горловины пучка на удалении  $Z \sim 1000$  мм – реализуется с использованием фазового корректора, имеющего радиус кривизны  $R = 600$  мм. Такой же подход применен для канализации волнового пучка вдоль ограниченного по ширине планарного диэлектрического волновода длиной 2000 мм.

На рис. 5, 6 показаны экспериментальным путем полученные поперечные распределения поля

в ОПДВ. Фазовый корректор выполнен из такого же материала, что и ОПДВ, и имел радиус кривизны  $R = 600$  мм. Наличие незначительного смещения середины пучка относительно геометрической оси волновода (соответствует  $y = 100$  мм) обусловлено угловым рассогласованием осей падающего волнового пучка и продольной оси ОПДВ.

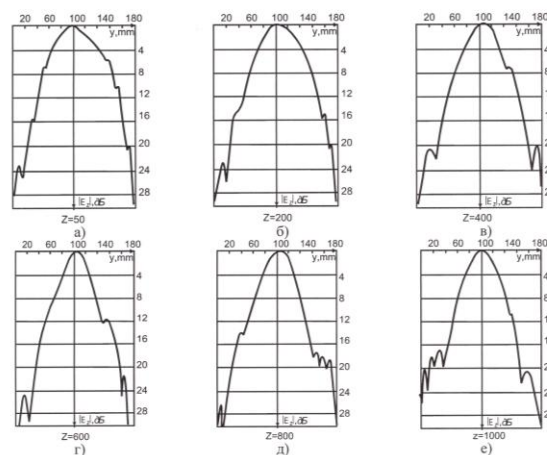


Рис. 5. Поперечные распределения поля в ОПДВ, снятые в различных поперечных сечениях : а)  $Z=50$  мм; б)  $Z=200$  мм; г)  $Z=600$  мм; е)  $Z=1000$  мм

Полученные экспериментальные результаты (сечения пучка в ОПДВ на различных удалениях от возбуждителя) подтверждают возможность построения планарной волноведущей структуры на базе ограниченной с боков диэлектрической пластины шириной в десятки длин волн и длиной в несколько сотен длин волн.

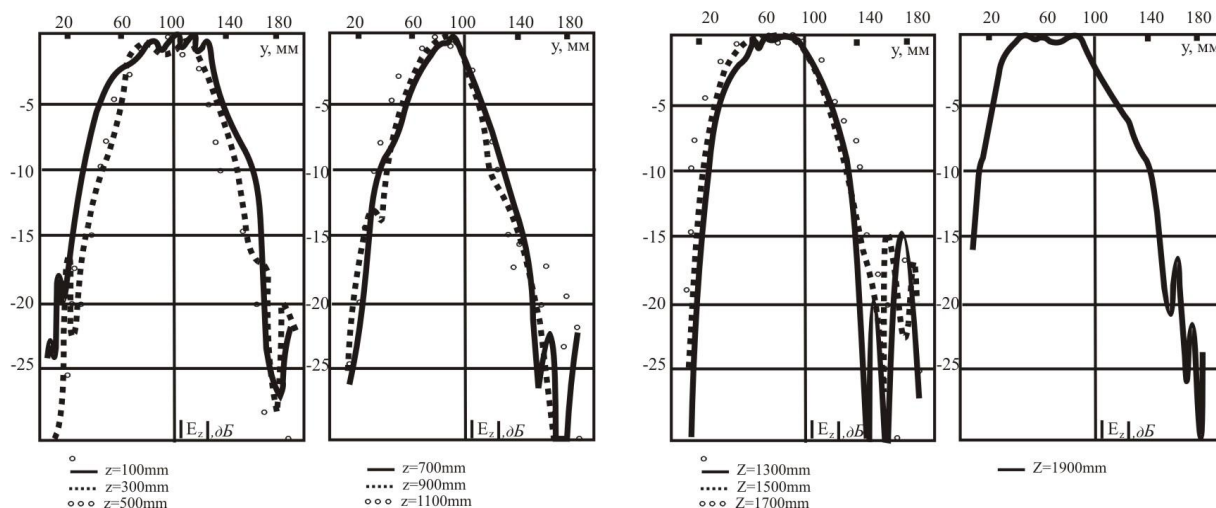


Рис. 6. Поперечные распределения поля в ОПДВ на различных удалениях от плоскости возбуждения: а)  $Z=100$  мм (сплошная);  $Z=300$  мм (точки);  $Z=500$  мм (кружки); б)  $Z=700$  мм (сплошная);  $Z=900$  мм (точки);  $Z=1100$  мм (кружки); в)  $Z=1300$  мм (сплошная);  $Z=1500$  мм (точки);  $Z=1700$  мм (кружки); г)  $Z=1900$  мм

Более подробная информация о поведении волнового пучка в ОПДВ вдоль продольной и поперечной координат приведена на рис. 7, 8.

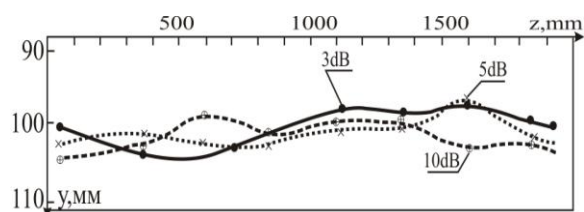


Рис. 7. Положение середины пучка на разных уровнях

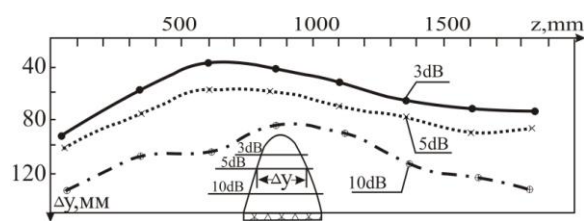


Рис. 8. Зависимость ширины пучка от продольной координаты на разных уровнях

Поведение  $E_z$  компоненты поля в волноводе при распространении волнового пучка ( $E_z = f(z)$ ) характеризуется рис. 9, где приведено семейство кривых  $E_z = f(z)$ , снятых при различных положениях зонда относительно продольной оси волновода (середине волновода соответствует значение  $y = 100$  мм). Спадающий к концу волновода характер зависимостей  $E_z = f(z)$  объясняется наличием потерь диэлектрического волновода, которые составляют  $\sim 3$  дБ/м (по измерениям амплитудных распределений в начале и в конце волновода и дальнейшим их интегрированием по поперечной координате).

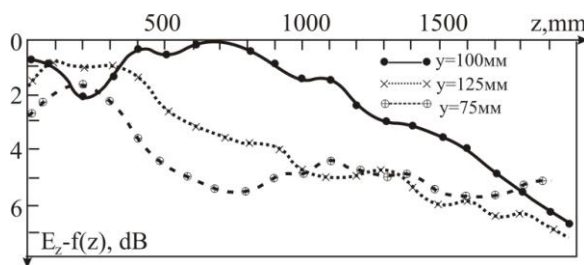


Рис. 9. Продольное распределение поля в ОПДВ

Еще одним аргументом в пользу выбранного и реализованного типа волны в ОПДВ является снятое распределение  $E_x = f(x)$ , измеренное на его открытом конце (рис. 10,а). Как и следовало ожидать, распределение поля по координате  $x$  имеет одну вариацию, спадая на 12 дБ при удалении от поверхности волновода на  $\pm 6$  мм.

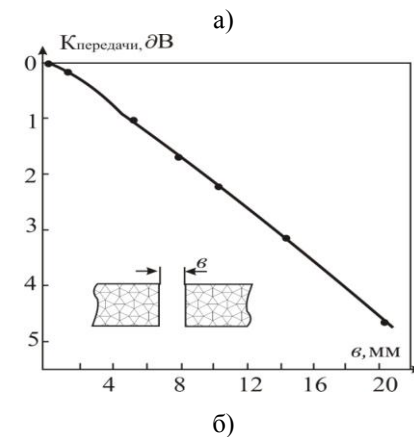
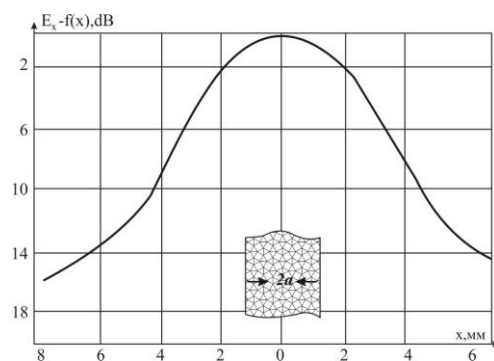


Рис. 10. Распределение поля на торце ОПДВ - а; зависимость коэффициента передачи от величины разрыва между пластинами - б

Следует заметить, что в силу конструктивно-технологических причин осуществить ОПДВ с размерами  $180 \times 2000 \times 3$  мм<sup>3</sup> из одного листа (без стыков) не представляется возможным. Поэтому ОПДВ изготавливался из пяти секций длиной 400 мм каждая. В связи с этим возникает необходимость исследования влияния величины стыка (разрыв между двумя частями волновода) на коэффициент передачи таким образом изготовленного волновода. Измеренная зависимость коэффициента передачи волновода, выполненного из двух секций с зазором между ними, от величины зазора представлена на рис. 10,б. Полученные результаты доказывают возможность реализации ОПДВ длиной 2000 мм путем набора его из секций меньшей длины, поскольку снижение коэффициента передачи на 0,1 дБ вызывается достаточно легко реализуемой на практике величиной зазора между секциями, равной  $0,1 \div 0,2$  мм.

**Выводы.** Выполненные исследования распределения полей ограниченного планарного волновода указывают на возможность построения волноводящей структуры на базе ограниченной с боков диэлектрической пластины шириной в десятки длин волн и длиной в несколько сотен длин волн.

Результаты работы могут быть полезны при разработке радиотехнических систем, ис-

пользующих ограниченные планарные диэлектрические волноводы (линии передачи и антенная техника миллиметрового диапазона).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке МОН Украины в рамках проекта №4.4.7Б ГНТП 4.4.

1. Шестопалов В. П. Дифракционная электроника». - Харьков: Вища школа, 1976. - 231 с.
2. Шестопалов В. П., Андренко С. Д., Бляев В. Г. та ін. Перетворення міліметрових і субміліметрових поверхневих електромагнітних хвиль в об'ємні і використання цього явища у фізиці й техніці // Вісн. АН УРСР. - 1977. - №1. - С.8-21.
3. Шестопалов В. П., Калмыков А. И., Комяк В. А. и др. Комплексные исследования природной среды Земли радиофизическим методом // Докл. АН СССР. - 1985. - 284, №1. - С.98-102.
4. Андренко С. Д., Евдокимов А. П., Крыжановский В. В. и др. Сканирующая антенна самолетного радиометрического комплекса // "Радиофизические методы и средства для исследования окружающей среды в мм диапазоне". - Киев: Наук. думка, 1988. - С.154-160.
5. Евдокимов А. П., Крыжановский В. В. Сканирующие антенны радаров мм волн для предупреждения столкновений транспортных средств // Успехи современной радиоэлектроники. - 2006, №4. - С.70-79.
6. Евдокимов А. П., Крыжановский В. В., Провалов С. А. Современное состояние проблемы сканирования лучом диаграммы направленности в антеннах радиометрических комплексов мм диапазона // "Радиофизические методы и средства для исследования окружающей среды в мм диапазоне". - Киев, Наук. думка, 1988. - С.160-166.
7. Андренко С. Д., Девятков Н. Д., Шестопалов В. П. Антенные решетки миллиметрового диапазона // Докл. АН СССР. - 1978. - 240, №6. - С.1340-1343.
8. Андренко С. Д., Провалов С. А., Сидоренко Ю. Б. Четырехлучевая антенная решетка мм диапазона // Тр. междуна-род. научной конф. ИРЭ МВ. - Таганрог. - 2005. - С.165-167.
9. Взятых В. Ф. Диэлектрические волноводы. - М.: Сов. радио, 1970. - 213 с.
10. Провалов С. А., Андренко С. Д., Дудка В. Г., Свищев Ю. В. Об одном методе определения фазового распределения излучателей миллиметрового диапазона // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2005. - 10, №13. - С.394-398.

11. Фрадин А. З. Антенны сверхвысоких частот. - М.: Сов. радио, 1957. - 647 с.
12. Литвиненко О. Н. Основы радиооптики. - Киев: Техника, 1974. - 206 с.
13. Борн М., Вольф Э. Основы оптики // Перев с англ. под ред. Г. П. Мотулевича. - М.: Наука, 1973. - 720 с.

## INVESTIGATIONS INTO THE FIELDS OF A BOUNDED PLANAR DIELECTRIC WAVEGUIDE

S. A. Provalov, S. D. Andrenko

Fields distributions (in broadside and longitudinal directions) of bounded planar dielectric waveguide have been studied. The results of the research allow to draw a conclusion about the fitness of electrodynamic system in the form of width-bounded dielectric waveguide (width consists of several tens of wave lengths) both for diffraction grating excitation and for ductwork of electromagnetic field of millimeter band at a distance of 200 wave lengths.

**Key words:** dielectric waveguide, wave length, field distribution, wave interference, exciter, sounder.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛІВ ОБМЕЖЕНОГО ПЛАНАРНОГО ДІЕЛЕКТРИЧНОГО ХВИЛЕВОДУ

С. А. Провалов, С. Д. Андренко

Досліджено розподіл полів (в поперечному та поздовжньому напрямках) обмеженого планарного діелектричного хвилеводу. Результати роботи дозволяють зробити висновок про придатність електродинамічної системи в вигляді обмеженого по ширині (ширина складає декілька десятків довжин хвиль) діелектричного хвилеводу як для збудження дифракційної ґратки, так і для каналізування електромагнітної енергії міліметрового діапазону на відстань більше ніж 200 довжин хвиль.

**Ключові слова:** діелектричний хвилевод, довжина хвилі, розподіл поля, інтерференція хвиль, збуджувач, зонд.

Рукопись поступила 16 июля 2007 г.