

01;09

# Волны в многослойном ферритодиэлектрическом поперечно намагниченном волноводе с электрически управляемым коэффициентом замедления

© К.В. Гузенко, Э.Ф. Зайцев

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: guzenko@radio.rphf.spbstu.ru

(Поступило в Редакцию 17 февраля 2003 г.)

Проведено исследование многослойных волноведущих структур, содержащих поперечно намагниченные ферриты. Построена численная теоретическая модель (метод Галеркина). Разработана экспериментальная методика исследования. Выявлено хорошее соответствие результатов расчетов и данных эксперимента. Исследование показало достаточно высокую степень фазовой активности таких структур, что позволяет использовать их для построения компактных фазовращателей миллиметрового диапазона волн. На базе таких структур также могут быть построены антенные системы нового класса — интегральные фазированные антенные решетки.

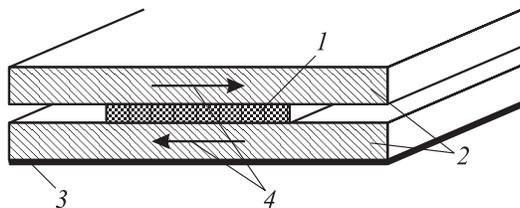
## Введение

Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию поперечно намагниченного трехслойного ферритодиэлектрического волновода (ФДВ), сечение которого показано на рис. 1.

Исследуемый волновод состоит из пластины диэлектрика с высокой проницаемостью, заключенной между двух ферритовых пластин, одна из которых металлизирована снизу. Таким образом, он представляет собой открытую волноведущую структуру, вдоль которой могут распространяться волны, поле которых сосредоточено главным образом в диэлектрической пластине.

Для управления намагниченностью ферритовых слоев рядом с диэлектрической пластиной между пластинами феррита помещаются провода управляющей обмотки (на рис. 1 не показаны). Изменение тока в этой обмотке позволяет изменять поперечную намагниченность ферритовых слоев и влиять на волны, распространяющиеся в ФДВ. За счет этого достигается электрическое управление свойствами волновода.

На основе описанного волновода в [1,2] предложена конструкция новой перспективной интегральной фазированной антенной решетки (ИФАР) миллиметрового диапазона волн с простым ферритовым управлением. В ней



**Рис. 1.** Поперечное сечение поперечно намагниченного трехслойного ферритодиэлектрического волновода, которому посвящена данная работа. 1 — диэлектрик, 2 — феррит, 3 — металл, 4 — намагниченность.

ФДВ служит интегральным распределителем мощности и фазы. Изменение намагниченности ферритовых слоев под действием управляющего тока меняет постоянную распространения волны в ФДВ и, следовательно, фазы излучателей, связанных с ним. Таким образом, в такой решетке возможно простое электрическое управление положением луча посредством изменения тока в управляющей обмотке.

На основе участка слоистого ФДВ также может быть создан компактный фазовращатель миллиметрового диапазона волн с простым электрическим управлением, обладающий меньшими потерями по сравнению с известными управляемыми полупроводниковыми фазовращателями.

Решение задачи о моделировании свойств ФДВ чрезвычайно важно для понимания физических механизмов процессов, происходящих в ИФАР и в управляемом фазовращателе.

Целью настоящей работы является построение адекватной теоретической модели ФДВ, позволяющей исследовать все типы волн, существующих в нем, степень их управляемости при изменении намагниченности ферритовых слоев, а также осуществлять оптимизацию характеристик структуры с точки зрения, например, максимизации управляемости и минимизации потерь путем подбора количества и параметров слоев (толщин, ширин, проницаемостей). Наличие такой модели избавит от необходимости в экспериментальном подборе этих параметров, который требует реального изготовления многочисленных образцов.

## Численное моделирование

Теоретическое моделирование ФДВ представляет собой сложную электродинамическую задачу в связи с неоднородностью его поперечного сечения, а также

с тем, что он содержит в себе намагниченные ферриты, являющиеся анизотропными невзаимными средами. Структура со слоями одинаковой ширины, ограниченными электрическими или магнитными стенками, в принципе позволяет построить аналитическое решение (с помощью метода эквивалентных длинных линий), однако получающиеся при этом формулы весьма громоздки и при их использовании необходимо применение ЭВМ. В данной работе исследуется волновод со слоями различной ширины (рис. 1), для которого невозможно построить аналитическое решение. Таким образом, остается использовать только какой-либо численный метод.

Если принять волновую зависимость от времени  $t$  и продольной координаты  $z$  в виде  $\exp[j(\omega t - \gamma z)]$ , то исходные уравнения Максвелла для решаемой задачи приобретают такой вид (для комплексных амплитуд полей)

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} - j\gamma \mathbf{z}_0 \times \mathbf{E} &= -j\omega \mu_0 \vec{\mu} \mathbf{H}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} - j\gamma \mathbf{z}_0 \times \mathbf{H} &= j\omega \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\vec{\mu}$  — тензор магнитной проницаемости феррита на СВЧ [3]. В области частот, далекой от ферромагнитного резонанса (а именно этот случай и рассматривается в данной работе, поскольку в ИФАР подмагничивающее феррит поле слабое), его можно представить в виде

$$\vec{\mu} \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} - j\mu_a \mathbf{H} \times \mathbf{m}_0, \quad (2)$$

где  $\mathbf{m}_0$  — единичный вектор направления намагничивания, в данном случае совпадающий с  $\mathbf{y}_0$ ;  $\mu$  и  $\mu_a$  — диагональный и недиагональный элементы тензора проницаемости соответственно [3].

Таким образом, итоговые уравнения, которым должно удовлетворять искомое решение, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} - j\gamma \mathbf{z}_0 \times \mathbf{E} + j\omega \mu_0 (\mu \mathbf{H} - j\mu_a \mathbf{H} \times \mathbf{y}_0) &= 0, \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} - j\gamma \mathbf{z}_0 \times \mathbf{H} - j\omega \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Для решения задачи моделирования ФДВ был избран численный метод Галеркина [4,5]. Этот метод является частным случаем известного метода моментов. В основе этого метода лежит представление компонент электромагнитного поля искомого решения в виде разложений по некоторым системам линейно независимых базисных функций

$$\begin{aligned} E_v(x, y) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{nm}^{(v)} \varphi_{nm}^{(v)}(x, y), \\ H_v(x, y) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M b_{nm}^{(v)} \psi_{nm}^{(v)}(x, y); v = x, y, z. \end{aligned} \quad (4)$$

Базисные функции  $\varphi_{nm}^{(v)}(x, y)$ ,  $\psi_{nm}^{(v)}(x, y)$  должны точно удовлетворять соответствующим граничным условиям на внешней границе поперечного сечения волновода,

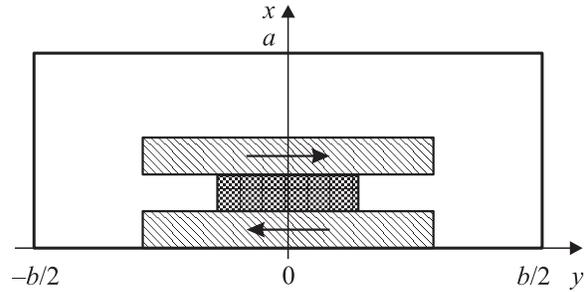


Рис. 2. Замыкание открытого ФДВ вспомогательными экранами.

и их системы должны обладать необходимой полнотой для представления искомого решения.

Поскольку реальный ФДВ является открытым (рис. 1), граничными условиями на границе его поперечного сечения являются условия на бесконечности. В принципе существуют системы базисных функций, удовлетворяющих таким граничным условиям, однако такие функции громоздки и неудобны в вычислениях. Поэтому для упрощения построения модели производится для полностью экранированного ФДВ: открытый ФДВ помещается в большой полый прямоугольный волновод (рис. 2). При этом возможно возникновение дополнительных мод — мод полой области, не имеющих отношения к модам в реальном открытом волноводе. Однако поля мод, существующих в открытом ФДВ, сосредоточены внутри и вблизи слоев и экспоненциально затухают при удалении от волновода, поэтому экраны, расположенные далеко от ФДВ, должны оказывать незначительное влияние на поля искомого мод, а дополнительные паразитные (или „ложные“) моды будут сильно чувствительны к положениям экранов. Именно на этом свойстве и основано разделение „истинных“ и „ложных“ мод: при варьировании положения вспомогательных экранов моды, соответствующие полой области, претерпевают сильные изменения, в то время как моды, соответствующие открытому ФДВ, не изменяют своих параметров.

Расстояния до вспомогательных экранов имеют свои оптимальные значения. С одной стороны, чем дальше расположены экраны, тем меньше их влияние на поля мод открытого ФДВ, тем точнее расчет этих мод, но, с другой стороны, тем больше требуется базисных функций для представления компонент полей искомого мод (в масштабах оболочки изменения полей становятся более резкими). Соответственно резко увеличивается время счета. К тому же количество „ложных“ мод также сильно увеличивается. Таким образом, имеются такие оптимальные расстояния до экранов, при которых уже достигнута требуемая точность вычисления параметров „истинных“ мод (при дальнейшем удалении экранов они уже почти не изменяются), но упомянутые отрицательные факторы проявляются еще в умеренной степени. Этот оптимум определяется в процессе решения задачи

(итеративно): если при увеличении расстояния до экранов параметры искомого мод не изменяются (в пределах заданной точности), то дальнейшее увеличение расстояния не производится и последующие расчеты структуры проводятся при найденных расстояниях до экранов.

Граничные условия на новой замкнутой границе очень просты, и базисные функции могут быть легко выбраны. В данной работе системы тригонометрических функций вида

$$\begin{Bmatrix} \sin \\ \cos \end{Bmatrix} \frac{n\pi x}{a} \begin{Bmatrix} \sin \\ \cos \end{Bmatrix} \frac{m\pi y}{b}$$

были взяты для разложения компоненты искомого поля. Подходящая комбинация синуса и косинуса для каждой компоненты поля определяется из соответствующего граничного условия. Эти базисные функции обладают необходимой полнотой (как тригонометрические функции) и очень удобны в вычислениях.

В соответствии с процедурой метода Галеркина [4,5] разложения (4) подставляются в левые части уравнений поля (3), записанных покомпонентно, полученные выражения домножаются на соответствующие базисные функции, интегрируются по поперечному сечению волновода и приравняются нулю. В результате образуется однородная система линейных алгебраических уравнений для коэффициентов разложений, содержащая в качестве свободного параметра постоянную распространения. Условие нетривиальности решения этой системы уравнений дает значения постоянных распространения мод, существующих в ФДВ (собственные числа), для которых определяются соответствующие наборы коэффициентов разложений (собственные векторы). При известных коэффициентах разложений, используя (4), вычисляется поле в любой точке волновода и соответственно любая необходимая интегральная характеристика моды.

На основе описанного алгоритма была создана компьютерная программа для решения задачи моделирования ФДВ и подобных ему структур. Эта программа принимает параметры волновода (размеры слоев, проницаемости и тангенсы потерь сред, намагниченность феррита) и частоту генератора в качестве входных параметров, строит соответствующую систему уравнений, решает ее и определяет все необходимые характеристики мод, используя вычисленные коэффициенты разложений. Программа построена достаточно универсально: принимает структуры с любым числом слоев, произвольными ширинами и толщинами слоев и позволяет рассчитывать характеристики широкого класса структур, подобных ФДВ (рис. 1), что придает ей особую ценность.

## Методика экспериментального исследования

Для экспериментального исследования ФДВ и подобных ему структур используется специальный автоматизированный измерительный комплекс (АИК). Он предна-

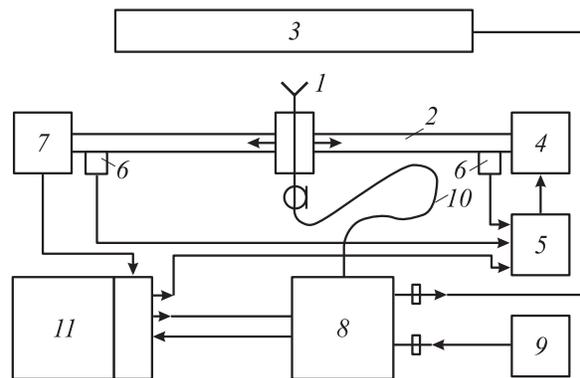


Рис. 3. Структурная схема измерительного комплекса.

значен для проведения измерений амплитудно-фазового распределения (АФР) на прямой линии вблизи апертуры (поверхности) исследуемого объекта. АИК оборудован миниатюрным вибраторным зондом, вносящим малое возмущение в измеряемое поле. Программное обеспечение АИК позволяет проводить измерение АФР, проверку точности измерений (режим калибровки), вывод данных на монитор или принтер, сохранение результатов измерений в файл. Структурная схема АИК показана на рис. 3. Зонд 1 движется вдоль исследуемого объекта 3 посредством червячной передачи 2. Электромотор 4, запускающий механизм, управляется контролируемым компьютером блоком управления 5. Диапазон движения зонда ограничен концевыми выключателями 6. Датчик меток 7 выдает импульсы, однозначно связанные с углом поворота главного вала 2, что дает возможность определения положения зонда с точностью  $\sim 0.1$  мм. Измерение амплитуды и фазы поля выполняется датчиком амплитуды и фазы 8, на который поступает сигнал генератора 9. Для передачи сигнала от подвижного зонда в измеритель амплитуды и фазы используется специальный кабель 10 — коаксиальная линия передачи с тefлоновым наполнением и диаметром внешнего проводника 1.5 мм. Этот кабель достаточно гибок и допускает значительные сдвиги зонда, сохраняя свою электрическую длину в пределах точности в несколько градусов. Управление смещением зонда, работой измерителя амплитуды и фазы и вводом данных в компьютер выполняется с помощью согласующего устройства 11.

Основные параметры АИК: диапазон частот 32–35.7 GHz (использование АИК вне этого диапазона допустимо, но при снижении точности измерений); точность измерения АФР  $\pm 3^\circ$  (фаза) и  $\pm 0.5$  dB (амплитуда); длина участка измерений от 0.8 до 1200 мм; минимальное расстояние между отсчетами АФР 0.1 мм; точность позиционирования зонда  $\pm 0.1$  мм.

В нашем случае в качестве объекта исследования в АИК помещается участок ФДВ. Зонд движется практически по поверхности ФДВ (высота  $\sim 0.1$  мм) для того, чтобы реагировать на поля мод, распространяющихся

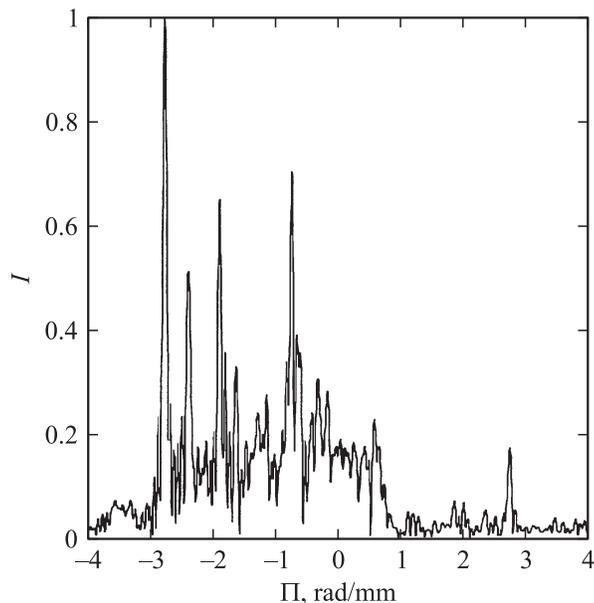


Рис. 4. Фурье-спектр АФР.

внутри ФДВ. Устройство возбуждения волновода включает в себя узкую щель для эффективного возбуждения различных мод.

Выходными данными АИК являются значения амплитуды и фазы поля в заданных точках поверхности ФДВ (отсчеты). Для получения конкретных необходимых характеристик волноводных мод, существующих в ФДВ, были разработаны специальная методика обработки результатов измерений и соответствующий пакет программ.

Из отсчетов амплитуды и фазы формируются отсчеты полной комплексной амплитуды поля. Далее они подвергаются преобразованию Фурье (в пространственной области). Теория предсказывает, что моды, существующие в ФДВ, имеют дискретные постоянные распространения и что любая волна в волноводе является суперпозицией этих мод. Таким образом, на фурье-спектре появляются отдельные пики, соответствующие модам, существующим в данном случае (на рис. 4 показан пример такого спектра для частоты 36 GHz). Параметры этих мод (постоянная распространения и коэффициент затухания) могут быть достаточно точно найдены по спектру.

Для каждой моды спектр преобразуется таким образом, что остается только соответствующий пик, в области этого пика спектр сохраняется, а вне ее заменяется нулевыми значениями. Далее новый („обрезанный“) спектр подвергается обратному преобразованию Фурье, т.е. получается АФР выбранной моды. Оно разделяется на амплитудное и фазовое распределения по отдельности. По амплитудному распределению с помощью линейной (в логарифмическом масштабе) аппроксимации легко определить коэффициент затухания, а по фазовому (также с помощью линейной аппроксимации) — постоянную распространения. С помощью описанного метода

постоянная распространения может быть определена с точностью 0.1–0.3%. Таким образом, из результатов достаточно простых измерений может быть получена очень важная информация о модах, существующих в исследуемом волноводе.

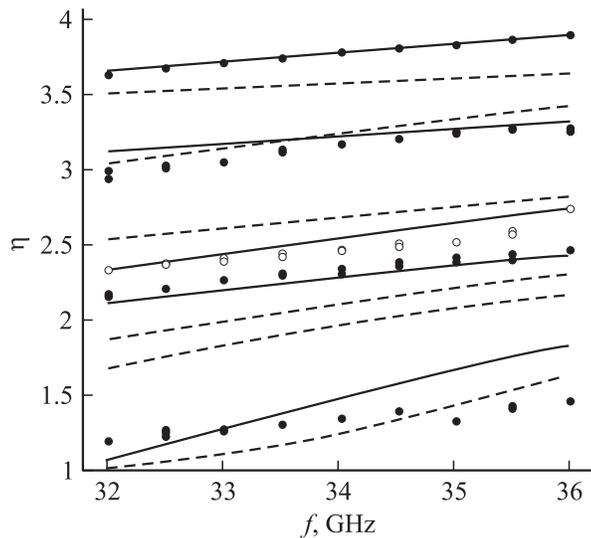
С помощью описанной методики также возможно исследование других важных свойств волновода. В реальной ИФАР желательнее возбуждение на входе ФДВ только основной моды (с наименьшей фазовой скоростью). Теоретическая модель возбуждающего ФДВ узла пока отсутствует. Но распределение уровней пиков мод в спектре может быть использовано для оптимизации этого узла. Также имеются планы по развитию предложенной методики для измерения коэффициента связи мод ФДВ с излучателями. Рассмотрение АФР в различных местах поверхности ФДВ позволяет судить о степени его неоднородности по длине, вызванной технологическими ошибками при его производстве. Моды, отраженные от оконечной нагрузки, также проявляются в спектре с противоположным знаком постоянной распространения. Рассматривая отражения, можно исследовать ту или иную нагрузку, подбирая обеспечивающую отражение какой-то конкретной моды. Возможны также и другие варианты исследований с применением описанной методики.

Данная методика была реализована в виде пакета программ для обработки результатов измерений и проведения исследований различных видов.

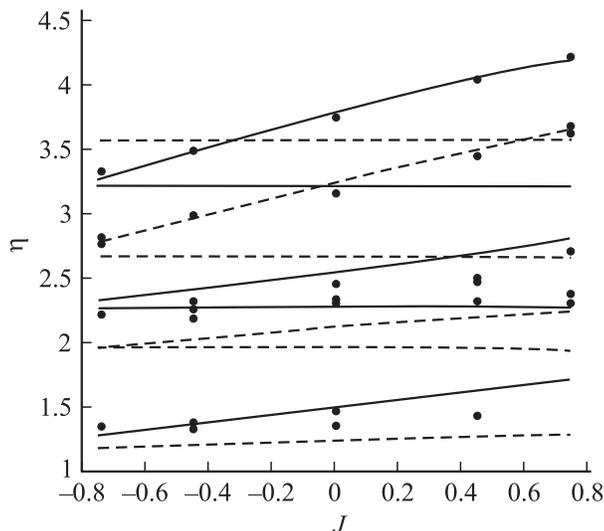
## Результаты исследований

Описанные выше методы теоретического и экспериментального исследования применимы к достаточно широкому классу структур, подобных рассматриваемому здесь ферритодиэлектрическому волноводу. Здесь мы приводим результаты исследований трехлопного волновода, поперечное сечение которого приведено на рис. 1, поскольку именно этот волновод лежит в основе ИФАР.

Рис. 5 показывает зависимости коэффициентов замедления (постоянных распространения, нормированных к волновому числу в вакууме) мод размагниченного ФДВ от частоты в достаточно широком диапазоне частот. Показаны как теоретические (линии), так и экспериментальные (значки) данные. Видно, что расчетные и измеренные результаты показывают абсолютное совпадение в случае основной моды (с наибольшим замедлением). Для мод с замедлениями в диапазоне 2–3.5 соответствие результатов также хорошее. Даже две моды с близкими значениями замедления (светлые точки) разрешаются и теоретически, и экспериментально. Данные по замедлению самой высшей моды (с наименьшим замедлением) согласуются не очень хорошо, однако уже то, что само присутствие этой моды предсказывается теорией, говорит в пользу построенной модели. Расхождение между расчетными и экспериментальными результатами неизбежно ввиду невозможности



**Рис. 5.** Частотные зависимости коэффициентов замедления различных мод ФДВ. Расчетные данные (линии) для симметричных (сплошные) и антисимметричных (пунктир) мод и экспериментальные значки.



**Рис. 6.** Управляемость различных мод ФДВ. Показаны расчетные данные (линии) для симметричных (сплошные) и антисимметричных (пунктир) мод и экспериментальные значки.  $JF$  — относительная намагниченность,  $\gamma$  — коэффициенты замедления всех мод.

ти учета всех особенностей реального ФДВ, таких как управляющая обмотка, замыкатели магнитного потока на краях структуры и т.д. [1,2]. Моды с замедлениями, меньшими единицы, не могут существовать в открытом ФДВ и в данном случае соответствуют вытекающим волнам или излучению открытой структуры. Эти моды очень чувствительны к положению экранов (рис. 2).

На рис. 6 показаны зависимости коэффициентов замедления различных мод ФДВ от относительной намагниченности ферритовых слоев (нормированной к вели-

чине намагниченности насыщения) для частоты 34 GHz. Значения намагниченности, представленные на рис. 6, соответствуют диапазону, достижимому на практике при изменении тока в управляющей обмотке в пределах  $\pm 1$  А. Как видно из рис. 6, различные моды ФДВ имеют различную степень управляемости при изменении намагниченности феррита. Некоторые из них вовсе не управляются. Наибольший интерес представляет основная мода ФДВ, она возбуждается с наибольшей из всех мод амплитудой и функционирование ИФАР [1,2] основано именно на ней. Ее коэффициент замедления изменяется от 3.27 до 4.18 (24%). В случае ИФАР это соответствует сектору сканирования лучом антенны около  $40^\circ$  [1,2]. Если на базе участка ФДВ создавать фазовращатель, то для получения полного поворота фазы на  $2\pi$  необходимая длина секции должна быть около 1.1 длины волны.

Такая высокая фазовая активность представленной слоистой среды объясняется именно ее слоистостью: наличием двух встречно намагниченных ферритовых слоев и диэлектрического слоя, который трансформирует структуру поля в ФДВ так, что практически во всей области, занятой ферритом, компоненты магнитного поля  $H_x$  и  $H_z$  близки по амплитуде и сдвинуты по фазе на  $\pi/2$ , т.е. совершают круговое вращение вокруг направления постоянной намагниченности.

Следует заметить, что не все рассчитанные моды обнаружены экспериментально (как пики в спектре) из-за их малого возбуждения на входе волновода и/или низкой связи с зондом.

В связи с симметрией поперечного сечения волновода (рис. 1) моды в нем разделяются на симметричные (с максимумом касательной компоненты электрического поля на оси волновода) и антисимметричные (с нулем на оси). Поскольку ФДВ возбуждается стандартным прямоугольным волноводом с симметричной модой и имеет симметричный волноводный трансформатор на входе, ранее предполагалось, что возбуждаются только симметричные моды. Однако сравнение данных рис. 6 показывает, что как минимум одна антисимметричная мода (вторая управляемая мода) возбуждается при проведении эксперимента. Это может быть объяснено наличием некоторой несимметрии входного волноводного трансформатора реального образца ФДВ.

## Заключение

В данной работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование трехслойного ферритодиэлектрического поперечно намагниченного волновода. Построена численная модель ФДВ с использованием метода Галеркина. Разработана специальная методика для проведения измерений и обработки их результатов. Расчетные и экспериментальные данные показывают хорошее совпадение, что свидетельствует об адекватности построенной модели реальной физической системе.

Показано, что различные моды волновода обладают различной степенью управляемости. Представляющая наибольший интерес основная рабочая мода показывает изменение своей постоянной распространения на 24% при изменении намагниченности ферритовых слоев в практически достижимом диапазоне, что означает достаточно высокую фазовую активность такой неоднородной среды, обусловленную именно ее слоистостью.

Построенная модель позволяет исследовать свойства волн, существующих в ферритодиэлектрических структурах достаточно широкого класса, а также осуществлять оптимизацию характеристик структуры с точки зрения, например, максимизации управляемости путем подбора количества и параметров слоев, что избавляет от необходимости в экспериментальном подборе, который требует реального изготовления многочисленных образцов.

Результаты исследования демонстрируют хорошие перспективы использования поперечно намагниченных ферритодиэлектрических структур для создания интегральных сканирующих антенн и компактных фазовращателей миллиметрового диапазона волн с электрическим управлением.

## Список литературы

- [1] *Zaitsev E.F., Yavon Y.P., Komarov Y.A. et al. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1994. Vol. 42. N 3. P. 304–310.*
- [2] *Khodorkovsky Y.S., Zaitsev E.F., Gousskov A.B. et al. // Proc. 1997 Antenna Application Symposium. Monticello, 1997. Section II.*
- [3] *Микаэлян А.Л. Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах. М.: Госэнергоиздат, 1963. 663 с.*
- [4] *Никольский В.В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. М.: Наука, 1967. 460 с.*
- [5] *Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1980. 596 с.*