

**УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
И ВОЛНОВОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИОДИЧЕСКИХ
МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

© 2010 г. Г. С. Воробьев, В. О. Журба, М. В. Петровский, А. А. Рыбалко

*Сумский государственный университет
Украина, 40007, Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2
Поступила в редакцию 28.01.2010 г.*

Описана экспериментальная установка и методика измерений электродинамических характеристик планарных периодических металлодиэлектрических структур, которые могут быть использованы при изготовлении практических устройств миллиметрового, субмиллиметрового и терагерцового диапазонов длин волн. Работоспособность установки проверена путем сравнения волноводных и пространственных характеристик, полученных экспериментально и численными методами в 4-миллиметровом диапазоне длин волн.

Использование периодических металлодиэлектрических структур (м.д.с.), образованных ленточной металлической решеткой на слое диэлектрика, перспективно как при построении электровакуумных приборов крайне высоких частот (типа оротрон и генератор дифракционного излучения [1, 2]), так и при интегральном исполнении различных функциональных узлов и приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, включая терагерцовый [3]. В отличие от отражательной металлической решетки, м.д.с. имеют ряд специфических особенностей, связанных с возможностью возбуждения пространственных волн черенковского, нормального и аномального дифракционных излучений при движении электронного потока вдоль м.д.с. [4, 5]. Поэтому необходима исчерпывающая информация о электродинамических параметрах м.д.с. при использовании их в различных устройствах. В [4] описан метод идентификации свойств волн пространственного заряда электронного потока, движущегося вдоль периодической структуры, с поверхностной волной диэлектрического волновода (д.в.). Этот метод нашел широкое применение при моделировании электродинамических характеристик различных режимов излучений пространственных волн на периодических металлодиэлектрических структурах, а также на нормальных металлических решетках. В [6] описана установка по исследованию преобразования поверхностных волн д.в. в объемные на нормальных металлических решетках. Однако ее применение для исследования м.д.с. требует модернизации измерительной части установки, учитывающей специфику анализируемого объекта: возможность присутствия объемных волн как в диэлектрике, так и за его пределами.

Ниже описана универсальная установка, с помощью которой можно анализировать электродинамические характеристики как м.д.с., так и традиционных металлических периодических структур. Результаты тестовых измерений сравниваются с численным анализом.

Комплексный экспериментальный стенд для определения электродинамических характеристик периодических неоднородностей (м.д.с., ленточных и отражательных металлических решеток) при возбуждении их поверхностной волной д.в. состоит из двух основных блоков (рис. 1): блока измерения волноводных характеристик (коэффициентов стоячей волны (к.с.в.), ослаблений и т.д.); блока измерения пространственных характеристик периодических структур (диаграмм направленности излучений в дальней зоне и амплитудных распределений полей в ближней зоне). В состав блока измерения пространственных характеристик входит исследуемый объект, который в общем случае представляет собой диэлектрическую призму 1 с нанесенной на ее боковую поверхность ленточной дифракционной решеткой 2. Призма 1 крепится на специальном юстирующем устройстве, позволяющем осуществлять ее пространственную ориентацию по осям x , y , z с погрешностью ± 0.1 мм. Диэлектрический волновод 3 включается в согласующие переходы 4, которые через волноводы заданного сечения, определяемого исследуемым диапазоном волн, сопряжены с блоком регистрации волноводных характеристик и согласованной нагрузкой 5. В зависимости от параметров д.в. (фазовой скорости поверхностной волны v_{ϕ}) и м.д.с. (ленточной решетки 2 с периодом l и диэлектрической проницаемостью ϵ призмы 1), возможны различные режимы трансформации поверхностных волн д.в. в объемные волны, которые воз-

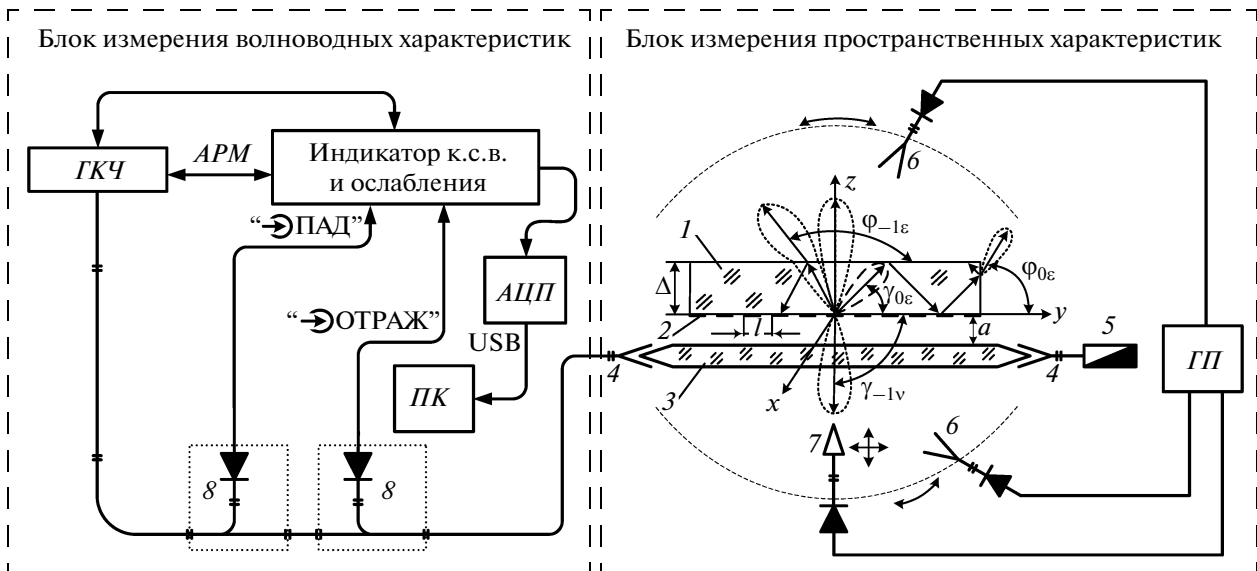


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. *ГКЧ* – генератор качающей частоты; *АРМ* – автоматический регулятор мощности; *АЦП* – аналого-цифровой преобразователь; *ПК* – персональный компьютер; *ГП* – двухкоординатный графопостроитель. *1* – диэлектрическая призма, *2* – ленточная дифракционная решетка, *3* – диэлектрический волновод, *4* – согласующие переходы, *5* – согласованная нагрузка, *6* – рупорная антенна, *7* – зонд, *8* – направленные ответвители; γ – углы излучения системы “м.д.с.–д.в.”, φ – углы соответствующих гармоник излучения в свободном пространстве после прохождения через диэлектрическую призму, x, y, z – пространственные координаты, Δ – толщина диэлектрического слоя, a – расстояние между д.в. и ленточной решеткой (*прицельный параметр*).

буждаются с индексами $n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ [4]. Основные из них схематично представлены в виде диаграмм направленности излучения на рис. 1: γ – углы излучения системы “м.д.с.–д.в.”, φ – углы соответствующих гармоник излучения в свободном пространстве после прохождения через диэлектрическую призму.

Блок измерения пространственных характеристик объекта состоит из двух подвижных рупорных антенн *б*, оси вращения которых в *E*-плоскости проходят через излучающую апертуру и совмещены с вертикальной осью решетки *2*, а ось вращения в *H*-плоскости совпадает с продольной осью д.в. *3*. Это обеспечивает регистрацию углов излучения в интервале $\varphi = 10^\circ - 170^\circ$ с погрешностью $\Delta\varphi = \pm 0.25^\circ$ при монтаже рупоров на специальных прецизионных передвижных устройствах и установлении их в дальней зоне исследуемых полей, которая определяется известным соотношением $z = a_m/\lambda$, где a_m – максимальный размер апертуры антенны, λ – длина волны излучения. В ходе измерения диаграмм направленности сигнал, принимаемый рупором *б*, поступал на вход “Y” двухкоординатного графопостроителя *ГП*, а вход “X” *ГП* подключен к датчику угла поворота приемного рупора. Таким образом, при перемещении подвижной антенны на графопостроителе фиксируется диаграмма направленности излучения, которая после преобразования в цифровой вид используется для компьютерной обработки полученных данных.

Амплитудные распределения полей вдоль осей излучающей системы исследуются в ближней зоне излучений ($z \approx \lambda$) при помощи зонда *7*, выполненного в виде диэлектрического клина ($\varepsilon = 2.05$), сопряженного со стандартным волноводным измерительным трактом через согласующий переход. Сигнал с зонда *7* после детектирования поступает на *ГП* и проходит компьютерную обработку. Характерные размеры зонда $\sim (0.1 - 0.2)\lambda$ обеспечивали минимальные искажения полей при измерениях. Система индикации поверхностных полей устанавливалась на каретке перемещения, при этом отсчеты по координатам x, y, z выполнялись с погрешностью ~ 0.1 мм.

В целом, вся система индикации пространственных характеристик и исследуемый объект устанавливались на единой массивной лабораторной платформе, оснащенной специальными прецизионными юстирующими устройствами, что позволяло ориентировать регулярную часть д.в. по отношению к плоскости м.д.с. с погрешностью ~ 0.1 мм и обеспечивать соответствующий контроль координат измерительных элементов установки и исследуемого объекта.

Блок измерения волноводных характеристик (рис. 1) строился на основе стандартного панорамного измерителя к.с.в. и ослабления, состоящего из блока генератора качающей частоты *ГКЧ*, индикатора к.с.в. и ослабления, направленных ответвителей *8* с детекторными секциями, подключенными к соответствующим разъемам инди-

катора к.с.в. В зависимости от способа включения ответвителей в измерительную линию, определялись графики либо коэффициента передачи, либо к.с.в. в заданном диапазоне частот. Полученные результаты обрабатывались при помощи разработанного аналого-цифрового преобразователя АЦП и поступали через шину USB в персональный компьютер ПК для дальнейшей обработки результатов измерений. Постоянный уровень мощности на входе в исследуемый объект обеспечивался автоматическим регулятором АРМ, входящим в панорамный измеритель, а минимальные отражения на выходе д.в. — включением в измерительный тракт согласованной нагрузки 5 (при измерении абсолютных уровней мощности в линии передачи использовались стандартные ваттметры, включенные непосредственно в измерительный тракт вместо согласованной нагрузки 5).

Методика проведения измерений на установке рис. 1

1. Согласование д.в. 3 с блоком измерения волноводных характеристик, которое заключается в достижении значений к.с.в., равных 1.1–1.2 для заданного частотного диапазона, путем оптимизации параметров согласующих переходов 4.

2. Определение относительной скорости поверхностной волны д.в. $\beta_v = v_{\phi}/c$ (c — скорость света) и уровня паразитного излучения от согласующих элементов 4. Для этого используется калибровочная отражательная дифракционная решетка, параметры которой рассчитаны на излучение по нормали (угол γ_{-1v} на рис. 1) в соответствии с методикой [6], и система индикации полей в дальней зоне (рупорные антенны 6).

3. Определение по методике [4] оптимального значения прицельного параметра a по минимальному искажению лепестков диаграмм направленности излучений на центральной частоте;

4. Определение параметров м.д.с. и д.в. для заданных режимов возбуждения объемных волн в соответствии с соотношениями работы [4].

5. Замена калибровочной отражательной решетки на исследуемую м.д.с.

6. Измерение пространственных характеристик м.д.с. с одновременным автоматическим контролем ее волноводных характеристик.

Описанная экспериментальная установка (рис. 1) реализована для диапазона частот 53–80 ГГц, что определило выбор в качестве панорамного измерителя к.с.в. и ослаблений прибора P2-69 и волноводных трактов сечением 3.6×1.8 мм². Диэлектрический волновод из фторопласта сечением 5.2×2.6 мм² позволил получить относительные фазовые скорости поверхностной волны в интервале $\beta_v = 0.78–0.81$ и возбудить на м.д.с. из фторопласта две основные пространственные гармоники

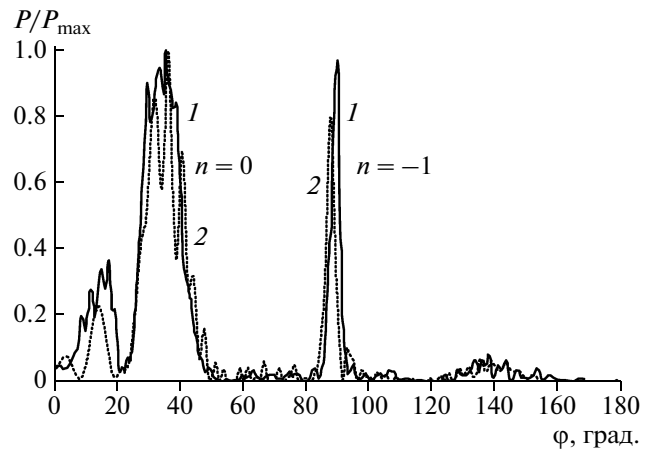


Рис. 2. Типичные диаграммы направленности излучений пространственных волн на м.д.с.: 1 — эксперимент, 2 — численное моделирование.

излучения: $n = 0$ ($l = 1.17$ мм) и $n = -1$ ($l = 3.07$ мм). Проведенные тестовые измерения к.с.в., диаграмм направленности излучений и амплитудных распределений полей в сравнении с численным анализом методом конечных разностей [7] дали удовлетворительные результаты. Так, в частности, на рис. 2 представлены диаграммы направленности излучений исследуемых м.д.с.

Из приведенных графиков следует, что эксперимент удовлетворительно коррелирует с численным анализом, а это в свою очередь подтверждает работоспособность описанной установки для исследования электродинамических характеристик нового класса периодических структур — планарных металлодиэлектрических, которые могут найти применение при реализации приборов миллиметрового, субмиллиметрового и терагерцового диапазонов волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Г.С., Петровский М.В., Кривец А.С. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2006. Т. 49. № 7. С. 56.
2. Vorobyov G.S., Petrovsky M.V., Ruban A.I. et al. // Telecommunications and Radio Engineering. 2007. № 66 (20). P. 1839.
3. Воробьев Г.С., Петровский М.В., Журба В.О. и др. // Харьковская нанотехнологическая ассамблея-2007. Харьков: ННЦ «ХФТИ», 2007. Т. 2. С. 133.
4. Генераторы дифракционного излучения / Под ред. В.П. Шестопалова. Киев: Наук. думка, 1991.
5. Воробьев Г.С., Петровский М.В., Цвык А.И. и др. // Вестник Сумского госун-та. Сер. Физика, математика, механика. 2005. № 4 (76). С. 159.
6. Шестопалов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т. 1.: Открытые структуры. Киев: Наук. думка, 1985.
7. Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.