

УДК 621.372.822

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ВОЛНОВОДОВ В ПОДЛОЖКЕ

С. В. Аверин, А. В. Мельников, Б. А. Мурмужев, В. А. Попов, В. В. Саламатин

Представлены результаты экспериментального исследования в диапазоне длин волн 1,5—2,5 мм структуры поля, дисперсионных характеристик и потерь в диэлектрической полосковой линии, состоящей из прямоугольного полиэтиленового волновода, запрессованного в профильный вырез фторопластовой подложки.

Актуальная проблема создания интегральных схем миллиметрового диапазона [1-4] в настоящее время может быть успешно решена на основе идей «интегральной оптики» [5-8]. Основная сущность этих идей заключена в использовании диэлектрической полосковой линии (ДПЛ) в качестве канализирующего тракта. ДПЛ обычно содержит металлическую или диэлектрическую подложку и диэлектрический волновод, размещенный на поверхности или погруженный внутрь подложки. Использование металлической подложки [9] улучшает поляризационную устойчивость и обеспечивает более широкий диапазон работы в одномодовом режиме. Однако наличие значительных потерь, обусловленных конечной проводимостью подложки, существенным образом снижает возможность практической реализации устройств в коротковолновой части миллиметрового диапазона. ДПЛ на диэлектрической подложке имеет значительно меньшие потери и допускает возможность работы в одномодовом режиме при больших размерах волновода. Однако они характеризуются худшей поляризационной устойчивостью, так как фазовые скорости двух основных типов волн E_{11}^y и E_{11}^x [5] сравнимы по величине.

Форма диэлектрического волновода и его ориентация в подложке существенным образом влияют на структуру поля, дисперсионные характеристики и потери в ДПЛ. Этими факторами определяется выбор рабочего типа волны, имеющего максимальную поляризационную устойчивость и минимальные потери при распространении сигнала.

Наибольший практический интерес с точки зрения технологичности закрепления в подложке, возможности использования в различных функциональных устройствах и простоты конструкции представляет исследование ДПЛ с диэлектрическим волноводом прямоугольного поперечного сечения.

В настоящей работе в диапазоне длин волн 1,5—2,5 мм экспериментально исследованы структура поля, дисперсионные характеристики и потери в ДПЛ, состоящих из прямоугольного полиэтиленового волновода (с размерами $a \times b = 4,7 \times 2,3$ мм²), запрессованного в соответствующие профильные вырезы (с размерами $4,7 \times 2,3$ мм² или $2,3 \times$

$\times 4,7 \text{ мм}^2$) фторопластовой подложки. ДПЛ с указанным форматом сечения полиэтиленового волновода в исследуемом диапазоне волн характеризуются одномодовым режимом работы на волнах E_{11}^x или E_{11}^y и поэтому могут быть использованы для создания пассивных и активных устройств миллиметрового диапазона.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ

Структура электромагнитного поля в ДПЛ исследовалась на экспериментальной установке, блок-схема которой изображена на рис. 1. Сигнал от генератора 1 (лампа обратной волны ОВ-22) по 2-миллиметровому волноводному тракту через регулировочный аттенюатор 2 и полупроводниковый модулятор 3 поступал на облучатель ДПЛ в виде открытого конца волновода 6 с согласователем 5 и поглотителем 7. Срезанный на переднем торце под углом Брюстера отрезок ДПЛ 8 устанавливался под углом к оси облучателя. С помощью магнитного зонда 9 исследовалась структура электромагнитного поля в плоскости торца ДПЛ. Сигнал с ДПЛ 8 через отверстие в диафрагме 15 возбуждал отрезок прямоугольного 2-миллиметрового волновода с детектором 10 на барьере Шоттки [10]. Огибающая амплитудно-модулированного сигнала с детектора 10 контролировалась селективным микровольтметром 11 (В-6-4). Магнитный зонд 9 совместно с детекторной головкой 10 закреплялся на оптическом юстировочном столике и имел возможность перемещения с помощью микрометрических винтов в плоскости торца ДПЛ с точностью установки $\pm 0,01 \text{ мм}$.

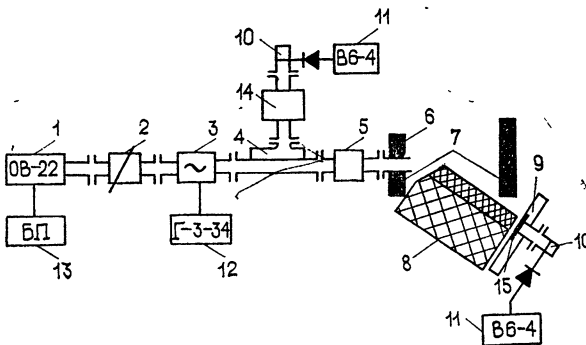


Рис 1. Блок-схема установки для исследования структуры поля в диэлектрических полосковых линиях: 1 — генератор, 2 — аттенюатор, 3 — полупроводниковый модулятор, 4 — ответвитель, 5 — согласователь, 6 — отрезок волновода, 7 — поглотители, 8 — отрезок диэлектрической полосковой линии, 9 — магнитный зонд, 10 — детектор, 11 — микровольтметр, 12 — низкочастотный генератор, 13 — блок питания, 14 — резонансный частотомер, 15 — диафрагма.

Угловое расположение отрезка ДПЛ 8 совместно с магнитным зондом 9 относительно оси возбуждателя 6 позволяло предотвратить влияние на показания детектора 10 паразитного сигнала от прямого прохождения с возбуждателя. ДПЛ изготавливалась запрессовкой прямоугольного полиэтиленового волновода с форматом сечения $4,7 \times 2,3 \text{ мм}^2$ в соответствующий профильный вырез фторопластовой подложки с размерами $20 \times 20 \times 240 \text{ мм}^3$.

2. СТРУКТУРА ПОЛЯ

На рис. 2 и 3 представлены результаты измерений распределения в поперечной плоскости ДПЛ 1 (формат сечения волновода $a \times b = 4,7 \times 2,3 \text{ мм}^2$) и ДПЛ 2 (формат сечения волновода $a \times b = 2,3 \times 4,7 \text{ мм}^2$) компонент электромагнитного поля E_y и H_x для волн E_{11}^y и E_{12}^y , а также компонент H_y и E_x для волны E_{11}^x . Хорошо видно, что в направлении, параллельном плоскости подложки, компоненты полей E_y и H_y имеют симметричное распределение. В направлении, перпендикулярном плоскости подложки, максимумы полей E_x и H_x сдвинуты соответственно на величины Δy_1 и Δy_2 в сторону подложки. Кроме того, в ДПЛ 2 (рис. 3) при $\lambda_0 = 1,73 \text{ мм}$ наблюдается возбуждение высшего типа волны E_{12}^y с различной величиной амплитуды поля H_x в области максимумов. Указанный характер распределения полей, очевидно, обусловлен несимметричным диэлектрическим окружением волновода в направлении, перпендикулярном плоскости подложки. Это приводит к большей концентрации поля вблизи границы раздела волновод — подложка ($y \leq -b/2$) по сравнению с концентрацией поля вблизи противоположной границы волновод — воздух ($y \geq b/2$).

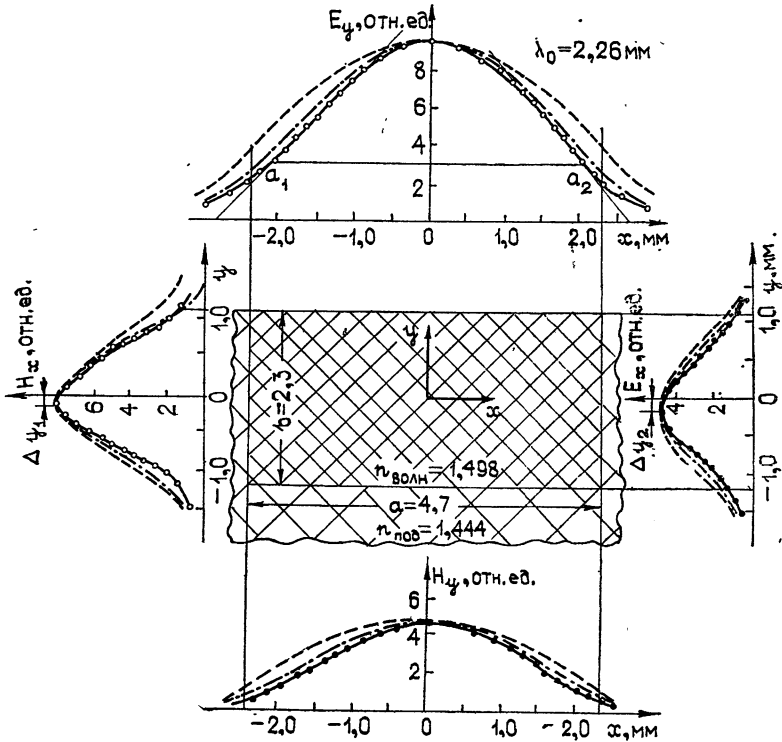


Рис. 2. Структура поля волн E_{11}^x и E_{11}^y : сплошная линия — эксперимент, пунктирная — теория, кружки — волна E_{11}^y , точки — волна E_{11}^x .

Внутри диэлектрического волновода $\left(x = \pm \frac{a}{2}, y = \pm \frac{b}{2}\right)$ измеренные кривые с достаточной степенью точности (штрихпунктирные линии) аппроксимируются косинусоидальными функциями:

$$\begin{aligned}
 E_y &= A \cos K_{x_1}^i a, \\
 H_y &= B \cos K_{x_1}^i a, \\
 E_x &= C \cos (K_{y_1}^i b + \beta), \\
 H_x &= D \cos (K_{y_1}^i b + \alpha).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

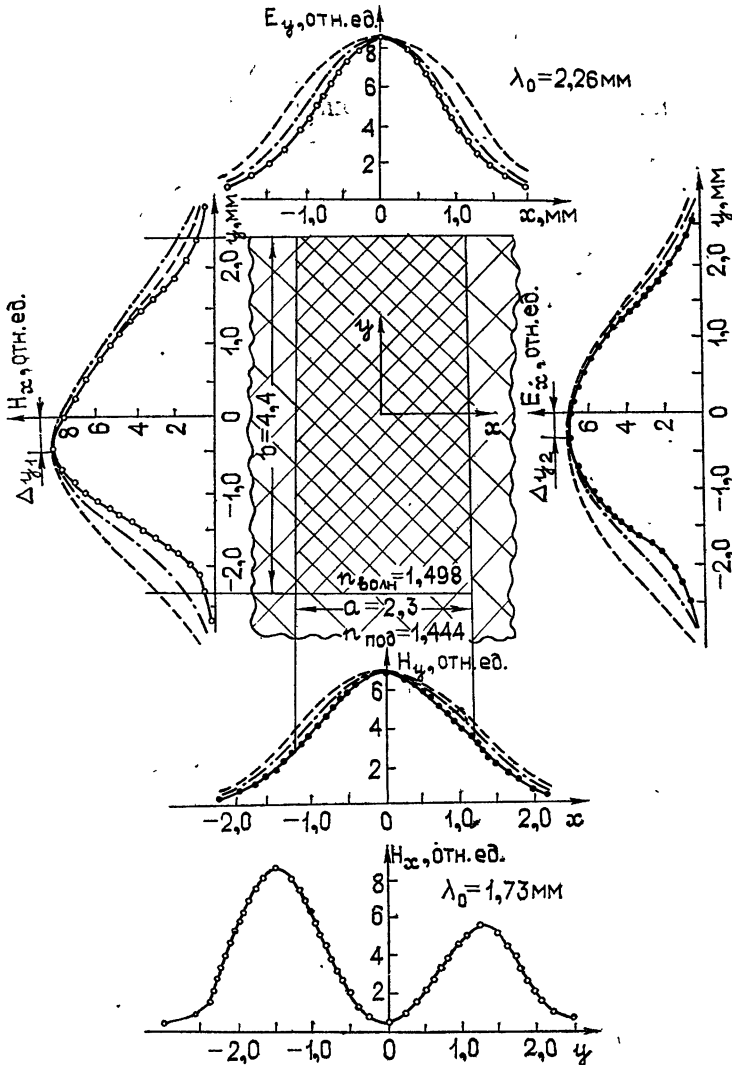


Рис. 3. Структура поля волн E_{11}^x , E_{11}^y и E_{12}^y : сплошная линия — эксперимент, пунктирная — теория, кружки — волна E_{11}^y и E_{12}^y , точки — волна E_{11}^x .

Вне диэлектрического волновода аппроксимация измеренных кривых производилась экспоненциальными функциями (штрихпунктирные линии):

$$\begin{aligned}
 E_y &= A_1 \exp(\pm K_{x_1}^e x), \\
 H_y &= B_1 \exp(\pm K_{x_2}^e x), \\
 E_x &= C_1 \exp(\pm K_{y_{1,2}}^e y), \\
 H_x &= D_1 \exp(\pm K_{y_{3,4}}^e y).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Поперечные волновые числа $K_{x_1}^l, K_{x_2}^l, K_{y_1}^l, K_{y_2}^l$, постоянные α и β , а также величины $K_{x_1}^e, K_{x_2}^e, K_{y_1}^e, K_{y_2}^e, K_{y_3}^e$ и $K_{y_4}^e$ подбирались из условия максимального совпадения кривых аппроксимирующих функций с экспериментальными кривыми.

Нетрудно заметить, что на экспериментально полученных кривых расстояние между точками перегиба, соответствующими начальным точкам экспоненциального затухания полей вне диэлектрического волновода, не равно геометрическому размеру волновода (в частности, на рис. 1 длина отрезка $a_1 a_2 \neq 4,7$ мм). Данный эффект, очевидно, обусловлен наличием дифракции волн на отверстиях в диафрагме зонда, конечными размерами его апертуры, а также неточностью юстировки зонда. Указанные факторы ограничивают точность экспериментальных данных. Проверка точности измерения по полю, создаваемому одноименным металлическим волноводом сечением $1,6 \times 0,8$ мм², показала, что ошибка эксперимента по предложенной методике измерений в диапазоне длин волн 2,5—1,5 мм находится в пределах 5—10%. Пунктирные кривые на рис. 2 и 3 рассчитаны по известным приближенным формулам Маркатилли [5]. Видно, что существует некоторое различие теоретических и экспериментальных кривых, превышающее ошибки эксперимента и теории. При этом в ДПЛ 2 наблюдается большее несоответствие теории и эксперимента. Указанный факт, по-видимому, связан с более высокой, по сравнению с ДПЛ 1, концентрацией энергии волн в областях, прилегающих к углам волновода. Этот эффект не учитывается теорией.

3. ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Существующие методы продольного зондирования электромагнитного поля для определения длины волны в диэлектрических волноводах [12] обладают значительной погрешностью измерения, обусловленной наличием паразитного излучения с локальных дефектов волновода. Указанное излучение искажает структуру поля бегущей или стоячей волны в диэлектрическом волноводе и не дает возможности точного определения дисперсионных характеристик.

Используя кривые распределения поля в поперечном сечении ДПЛ, можно определить поперечные волновые числа, а по известным соотношениям [5] рассчитать постоянную распространения и длину волны в ДПЛ. Данный метод свободен от вышеприведенных недостатков, так как зондирование производится в поперечной плоскости диэлектрического волновода, а наличие паразитного излучения в виде резонансных максимумов на кривых распределения поля не влияет на точность определения поперечных волновых чисел, а следовательно, и длины волны в волноводе.

Кроме того, ошибки эксперимента, обусловленные конечной апертурой отверстия в диафрагме зонда, дифракцией волн на этом отверстии и источностью юстировки зонда, можно учесть, если считать, что длина отрезка между точками перегиба на кривых распределения поля должна соответствовать геометрическому размеру диэлектрического волновода.

При условии косинусоидальной аппроксимации распределения поля внутри диэлектрического волновода поперечные волновые числа легко определяются экстраполяцией экспериментальных кривых на нулевой уровень амплитуды. При этом можно записать

$$K_x^i = \frac{\pi}{x + \Delta x}, \quad K_y^i = \frac{\pi}{y + \Delta y}, \quad (3)$$

где x и y — расстояние между точками пересечения экстраполяционных прямых соответственно с осью абсцисс и ординат, Δx и Δy — величины поправки, определяемые по разнице длины отрезка между точками перегиба на экспериментальных кривых и геометрическими размерами волновода. Точность определения поперечных волновых чисел K_x^i и K_y^i в данном случае при условии отсчета величин x и y по микрометрической шкале не хуже $\pm 0,6\%$. С учетом нестабильности частоты генератора точность определения λ_b , а следовательно, и дисперсионных характеристик $\pm 1\%$.

На рис. 4 представлены дисперсионные характеристики волн E_{11}^y и E_{11}^x . Видно, что в пределах ошибки эксперимента $\pm 1\%$ дисперсионные кривые для волн E_{11}^y и E_{11}^x как в ДПЛ 1, так и в ДПЛ 2 не отличаются друг от друга. Однако возбуждение в ДПЛ 2 при $\lambda_0 = \lambda_{кр} = \sqrt{ab}/1,9$ высшего типа волны E_{12}^y и отсутствие возбуждения высших типов волн E_{mn}^x указывают на то, что в ДПЛ 2 волна E_{11}^y имеет более высокую, чем волна E_{11}^x , степень замедления. Указанный факт подтверждается также исследованием поляризационной устойчивости волн, которая легко определяется при заданной поляризации возбуждающего ДПЛ-сигнала по отношению амплитуд сигналов при повороте магнитного зонда вокруг своей оси на 90° . Величина этого отношения зависит от степени деполяризации волны и длины ДПЛ. В ДПЛ 2 для волн E_{11}^y и E_{11}^x эти отношения соответственно равны $1,34 \text{ дБ/см}$ и $1,04 \text{ дБ/см}$ при $\lambda_0 = 2,20 \text{ мм}$, а в ДПЛ 1 — $1,38 \text{ дБ/см}$ для волны E_{11}^x и $1,27 \text{ дБ/см}$ для волны E_{11}^y .

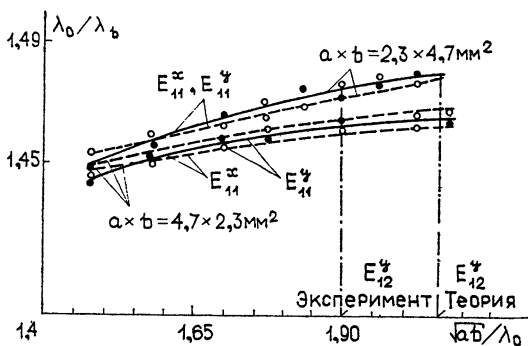


Рис. 4. Дисперсионные характеристики волн E_{11}^x и E_{11}^y в диэлектрической полосковой линии с различной ориентацией полиэтиленового волновода во фторопластовой подложке:

сплошная линия — эксперимент, пунктирная — теория, кружки — E_{11}^y , точки — E_{11}^x .

Указанные измерения являются косвенным доказательством того факта, что в ДПЛ 1 большей степенью замедления обладает волна E_{11}^x , а в ДПЛ 2 — волна E_{11}^y . Для ДПЛ 1 данный вывод подтверждается

расчетом (пунктирные кривые) по приближенным формулам Маркатилли [5]. Однако для ДПЛ 2 расчет указывает на вырождение волн E_{11}^y и E_{11}^x (при $\epsilon_{\text{чолн}} = 2,24$ и $\epsilon_{\text{подл}} = 2,08$) и, кроме того, дает значительно меньшую величину $\lambda_{\text{кр}}$ для возбуждения волны E_{12}^y ($\lambda_{\text{кр}} = \sqrt{ab}/2,06$), чем наблюдается в эксперименте. Эти факты, очевидно, обусловлены увеличением степени замедления волны E_{11}^y в ДПЛ 2 за счет большей концентрации ее энергии в областях, прилегающих к углам волновода. Действительно, из рис. 3 следует, что отношение амплитуд поля E_y для волны E_{11}^y в области, прилегающей к углам волновода, в области максимума составляет 0,37, а для поля E_x волны E_{11}^x — 0,11. На наш взгляд, именно данный эффект приводит к снятию вырождения по поляризационной устойчивости волн E_{11}^y и E_{11}^x и расхождению между теорией и экспериментом для ДПЛ 2.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ

Измерение потерь в ДПЛ производилось двухзондовым методом [11] на измерительной ячейке, конструкция которой изображена на рис. 5. В качестве возбудителя ДПЛ использовался плавный рупорный переход 1 от одномодового волновода на отрезок квазиоптического тракта 2 с корректирующей линзой 3. На выходе возбудителя форми-

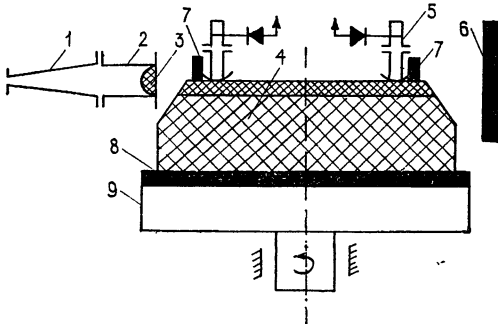


Рис. 5. Конструкция измерительной ячейки для исследования потерь в диэлектрических полосковых линиях:

1 — рупорный переход, 2 — отрезок квазиоптического тракта, 3 — корректирующая линза, 4 — отрезок диэлектрической полосковой линии, 5 — детектор, 6, 7, 8 — поглотители, 9 — поворотный оптический столик.

ровалось поле практически плоской волны. Отрезок ДПЛ 4 длиной 240 мм имел срезы под углом Брюстера, возбуждался непосредственно с торца и устанавливался на поворотном оптическом столике 9. Детекторы 5 закреплялись неподвижно на поверхности волновода на расстоянии 200 мм друг от друга. Соблюдалось строго симметричное расположение детекторов относительно концов ДПЛ. Поглотители 6, 7 и 8 служили для предотвращения паразитных резонансов, обусловленных неконтролируемыми переотражениями сигнала. Срез под

углом Брюстера практически обеспечивал режим бегущей волны в ДПЛ с КСВ=1,02, что контролировалось измерительной линией.

Для исключения ошибок измерений, вызванных неидентичностью характеристик детекторов, неточностью их установки, а также наличием переотражений между детекторами, производилось двукратное измерение потерь при прямом и обратном возбуждении ДПЛ, осуществляемое поворотом столика с отрезком ДПЛ на 180°. При этом предусматривались идентичные условия возбуждения ДПЛ. При таком методе основная ошибка измерения $\pm 0,01$ дБ/см была связана с трудностью соблюдения идентичных условий прямого и обратного возбуждения ДПЛ и неточностью симметричной установки детекторов. Однако и достигнутая точность измерения малых потерь на коротких отрезках ДПЛ значительно превышает точность известного метода [12] с подвижным зондом для определения малых затуханий в пленочных волноводах.

Частотная зависимость величины потерь для волн E_{11}^y и E_{11}^x в ДПЛ 1 и ДПЛ 2 представлена на рис. 6. Хорошо видно, что при уменьшении длины рабочей волны происходит нелинейный рост потерь всех типов волн. В ДПЛ 1 этот рост происходит более плавно, чем в ДПЛ 2. Строгое объяснение этого факта в настоящее время отсутствует, но, возможно, это явление связано с большей концентрацией поля в ДПЛ 2 на границе раздела полосок — подложка и, следовательно, более высоким вкладом в суммарную величину затухания потерь из-за рассеяния волн на дефектах подложки [13]. При распространении волн E_{11}^x в обоих ДПЛ наблюдаются более высокие потери. Указанный факт, очевидно, связан с несимметричной конструкцией ДПЛ и, как следствие этого, поляризационной зависимостью потерь, возможно вызванных большим вкладом в суммарную величину затухания потерь из-за рассеяния волны E_{11}^x на дефектах, хаотически распределенных на боковых поверхностях волновода [15].

Интересно отметить, что на всех кривых отсутствуют резкие максимумы, обусловленные резонансным рассеянием волн на локальных дефектах [14]. Поэтому основной вклад в величину потерь ДПЛ вносят диэлектрические потери в материале волновода и подложки, потери из-за рассеяния волн на хаотически распределенных дефектах и изгибах, а также потери на деполаризацию волн. В предложенном методе измерений определяется суммарная характеристика всех потерь на определенном участке ДПЛ. Это не дает возможности количественно сопоставить экспериментальные результаты с предсказаниями теории [15]. Однако нелинейная зависимость суммарных потерь от длины волны наблюдается и на экспериментальных кривых.

Таким образом, сравнительный анализ влияния ориентации волновода на дисперсионные характеристики и потери показал, что ДПЛ с соотношением сторон прямоугольного волновода $a < b$ имеют лучшую поляризационную устойчивость и величину потерь в них не превышает 0,2 дБ/см при $\lambda_0 = 1,85$ мм. Это позволяет рекомендовать указанный тип ДПЛ в качестве функционального элемента пассивных и активных устройств коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Авторы выражают благодарность В. Ф. Взятыхеву и В. В. Мериакри за полезное обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. M. Knox, K. J. Brandt and I. E. Kietzer, Proc. IEEE, Nat. Aerosp. and Electr. Conf., 1974, p. 381.
2. W. V. McLevige, T. Itoh and R. Mittra, IEEE Trans., MTT-23, 788 (1975).
3. R. M. Knox and P. P. Toulis, Proc. Symp. Submill. Waves, VXX, April, 1970.
4. В. Ф. Взятыхев, Б. И. Рябов, Ю. И. Орехов, Всесоюзный симпозиум по приборам, технике и распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере, М., 1976, стр. 111.

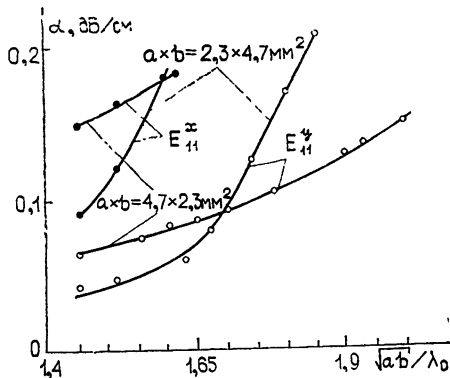


Рис. 6. Зависимость потерь волн E_{11}^x и E_{11}^y от длины волны в диэлектрической полосковой линии с различной ориентацией полиэтиленового волновода во фторопластовой подложке.

5. E. A. J. Marcatili, Bell System Tech. J, 48, 2071 (1969)
6. В. Ф. Взятыйшев, Г. Д. Рожков, А. Н. Меркурьев, Зарубежная радиоэлектроника, № 12, 60 (1970).
7. В. И. Аникин, Зарубежная радиоэлектроника, № 7, 111 (1971)
8. H. Kogelnik, IEEE Trans., MTT-23, 2 (1975).
9. S. P. Schlesinger and D. D. King, Trans, MTT-6, 270 (1958)
10. С. В. Аверин, В. А. Попов, Радиотехника и электроника, 22, № 5, 1057 (1977).
11. В. Д. Каплун, А. Д. Плоткин, В. В. Саламатин, Всесоюзная научная сессия НТО РЭС, М., 1974, стр. 75.
12. I. E. Goell, R. D. Standlee and T. Li, Electronics, 20, 60 (1970)
13. G. Gloge, Appl. Opt., 11, 2506 (1972).
14. D. B. Keck and A. R. Tynes, Appl. Opt., 11, 1502 (1972)
15. S. E. Miller, E. A. J. Marcatili and T. Li, Proc. IEEE, 61, 1703 (1973).

Институт радиотехники
и электроники АН СССР

Поступила в редакцию
11 апреля 1977 г.,
после доработки
25 октября 1977 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF DIELECTRIC STRIP LINES OF MILLIMETER WAVE RANGE WITH A SUBLAYER

S. V. Averin, A. V. Mel'nikov, B. A. Murmushev, V. A. Popov, V. V. Salamatin

The results of experimental investigation of the field structure, dispersion characteristics and dielectric losses of a strip line made at the wavelengths of 1.5—2.5 mm are presented. The strip line consists of a rectangular polyethylene waveguide pressed in a profile cut-off of a fluorine plastic sublayer.
