

лась ранее необлученная область образца независимо от исхода испытания. Наличие пробоя фиксировалось визуально по искре. При расчете $c(q)$ на основании (8) использовались функции $P(I)$, полученные в [4], которые удовлетворяют сформулированным нами условиям. Объем статистической выборки, использованной при вычислениях, полторы тысячи точек.

Из приведенной на рис. 1 $c(q)$ видно, что ансамбль включений в исследованном образце полиметилметакрилата состоит из трех типов включений с различными порогами пробоя. Для выяснения их природы необходимы дополнительные исследования.

Результаты работы создают основу для последовательного анализа экспериментальных данных по статистике оптического разрушения и позволяют практически реализовать определение функции распределения включений, инициирующих разрушение.

Авторы выражают благодарность Н.Е. Хаплановой за предоставленные экспериментальные данные.

Научно-исследовательский институт
органических полупродуктов и красителей
Москва

Поступило
17 VI 1985

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин И.В., Анисимов С.И., Бонч-Бруевич А.М. и др. – ЖЭТФ, 1976, т. 70, № 4, с. 1214–1224.
2. Данилейко Ю.К., Минаев Ю.П., Николаев В.Н., Сидорин А.В. – Квант. электрон., 1981, т. 8, № 11, с. 2362–2370.
3. Колдунов М.Ф., Уланов С.Ф. – ЖТФ, 1982, т. 52, № 1, с. 151–153.
4. Колдунов М.Ф. – ДАН, 1984, т. 277, № 6, с. 1384–1386.
5. Данилейко Ю.К., Минаев Ю.П., Сидорин А.В. – Квант. электрон., 1984, т. 11, № 4, с. 757–765.
6. Азаров В.В., Агросченко Л.В., Данилейко Ю.К. – Там же, 1985, т. 12, № 1, с. 151–154.
7. Данфорд Н., Шварц Дж.Т. Линейные операторы. М.: ИЛ, 1979, т. 3. 659 с.
8. Бухгейм А.Л. Уравнения Вольтерра и обратные задачи. Новосибирск: Наука, 1983, 204 с.
9. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. М.: Мир, 1984, т. 1, 350 с.
10. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974, 284 с.
11. Шметгерер Л. Введение в математическую статистику. М.: Наука, 1976, 520 с.

УДК 621.396.677.71.001.24

Ф И З И К А

В.В. КРЫЖАНОВСКИЙ, академик АН УССР В.П. ШЕСТОПАЛОВ

РЕБЕРНЫЕ ВОЛНЫ СВЕРХРАЗМЕРНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛЕНТЫ

Простейшими структурами, обладающими способностью направлять электромагнитную энергию, являются многопроводные линии, в том числе полосковые и щелевые [1–3]. Характерные размеры проводников и зазоров между ними, как правило, не превышают длины волны. В данном режиме при неизотропном диэлектрическом заполнении в таких структурах могут распространяться квазиТЕМ-волны. Анализ полосковых и щелевых структур проведен в работах [4, 5].

Следует отметить, что способностью направлять электромагнитную энергию обладают также и однопроводные линии с конечной проводимостью металла. Поле основной волны при этом имеет вид неоднородной плоской волны, фазовая скорость которой определяется проводимостью металла, геометрией проводника и длиной волны. Так, металлическая плоскость поддерживает волну Ценнека, круглый метал-

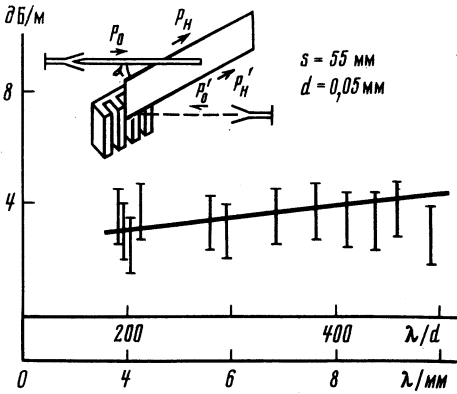


Рис. 1

Рис. 1. Затухание реберной волны и волны Зоммерфельда (сплошная линия) в диапазоне волн 4–10 мм

Рис. 2. Линии равных величин напряженности поля реберной волны

Рис. 3. Преобразование силовых линий волны Зоммерфельда в узкой ленте в силовые линии реберных волн при увеличении ширины ленты

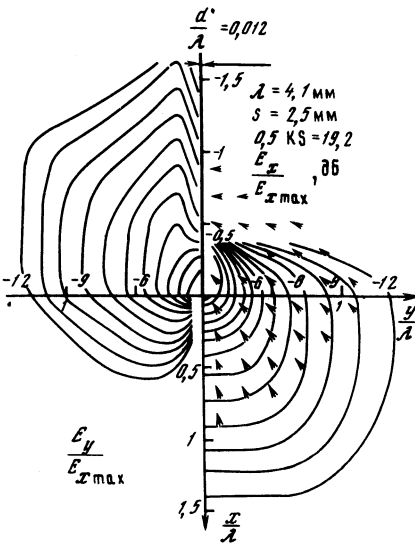


Рис. 2

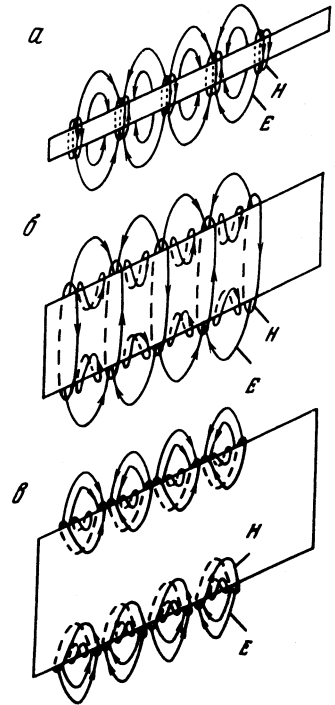


Рис. 3

лический стержень – волну Зоммерфельда [6]. Преобразование поперечного сечения проводника от кругового к виду, соответствующему ленте, приводит к искажению структуры поля волны Зоммерфельда и характерному возрастанию напряженности электрического поля на краях ленты [7]. При постепенном увеличении ширины ленты (вплоть до размера, сравнимого с длиной волны) максимумы, связанные с ребрами, все более разделяются, а напряженность поля на середине ленты падает [7]. Таким образом, можно прийти к заключению, что в очень широкой металлической ленте плотность потока энергии распределяется крайне неравномерно по поперечному сечению, что свидетельствует о возможности распространения изолированных волн вдоль каждого ребра металлической ленты.

1. Здесь представлены экспериментальные результаты исследования распространения электромагнитной волны вдоль одного ребра сверхразмерной металлической ленты. Эти волны обладают рядом особенностей, которые не могут быть сведены к известным. Поэтому этот класс поверхностных волн сверхразмерной металлической ленты мы назвали реберными волнами. Измерения проведены в диапазоне длин волн 4–10 мм, в качестве ленты использована медная фольга толщиной 0,02–0,05 мм. Возбуждение волны вдоль ребра ленты проводится двумя способами.

В первом случае использован дифракционный ввод энергии в одно из ребер ленты как в линию передачи поверхностных волн [8, 9]: связь между минус первой пространственной гармоникой дифракционной решетки и волной в линии осуществляется продольной по отношению к ребру компонентой вектора напряженности электрического поля. Во втором случае использована непосредственная связь ребра ленты с диэлектрическим волноводом. Режим фазового синхронизма между волной кромки и волной HE_{\perp} диэлектрического волновода обеспечивается расположением структур таким образом, что угол между ребром и осью диэлектрического волновода составляет величину $\alpha = \arccos \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$, где γ_1 — постоянная распространения волн вдоль

ребра, γ_2 — постоянная распространения волны HE_{\perp} . Расстояние от места возбуждения до участка, на котором проводятся измерения, составляет 1,2 м.

В процессе прямых измерений регистрируется поперечное и продольное распространение поля в режиме бегущих и стоячих волн. Поперечная компонента вектора напряженности электрического поля определяется коаксиальным зондом с диполем на конце, продольная — суженным концом полого металлического волновода.

Измерения структуры поля волны, распространяющейся вдоль ребра ленты, показывают, что форма поперечного распределения поля не меняется от одного сечения линии к другому. Вдоль линии наблюдается спадание напряженности поля за счет омических потерь в металле. Среднее значение величины потерь в диапазоне волн $\lambda = 4-10$ мм составляет 3,2 дБ/м для ленты толщиной $d = 0,02$ мм и шириной $s = 55$ мм (рис. 1). Такой же порядок и аналогичное поведение имеет затухание волны Зоммерфельда в круглом медном проводнике диаметром 0,05 мм (сплошная линия на рис. 1), что подчеркивает некоторое сходство этих волн. Однако в отличие от волны Зоммерфельда в узкой металлической ленте энергия реберных волн в сверхразмерной ленте переносится независимо друг от друга. При одновременном возбуждении двух ребер ленты на различных длинах волн $\lambda_1 = 9,0$ мм, $0,5 k_1 s = 19,2$ и $\lambda_2 = 6,7$ мм, $0,5 k_2 s = 25,8$ вдоль каждого ребра регистрируется своя картина стоячих волн, причем развязка между каналами составляет 23 дБ.

В отличие от волны Зоммерфельда, обладающей нулевой критичной частотой, волна, распространяющаяся вдоль одного ребра, имеет, по-видимому, критическую длину волны, зависящую от ширины ленты. При экспериментальном исследовании ленты с параметрами $d = 0,02$ мм, $s = 55$ мм реберную волну не удалось возбудить при длинах волн, больших 10 мм ($0,5 ks = 17,3$).

2. Результаты измерений структуры электрического поля реберной волны представлены на рис. 2 в виде линий равных значений напряженности поля. Поле симметрично относительно плоскости ленты, поэтому для упрощения рисунка слева представлены линии равных значений E_y , справа E_x . Распределения свидетельствуют о том, что поле волны концентрируется вблизи ребра ленты, причем при $x > 0$ преобладает компонента поля E_x , а при $x < 0$ — E_y . Ориентация полного вектора E_{\perp} ($|E_{\perp}| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$) в каждой точке в окрестности ребра представлена стрелками. Граничные условия на металле выполняются достаточно хорошо, поскольку поперечная составляющая вектора напряженности электрического поля вблизи металлической поверхности ориентируется перпендикулярно последней.

Схематическое изображение силовых линий электрического и магнитного поля исследуемой волны представлено на рис. 3в. Силовые линии магнитного поля имеют вид замкнутых колец и по своей форме полностью аналогичны линиям H щелевой волны вблизи ребер в планарной [1-3] и цилиндрической щелевой линии [10]. Силовые линии электрического поля берут начало на металле, замыкаются через продольную компоненту вектора E , входят в металл и замыкаются через про-

дольные токи в ленте. Вид силовых линий электрического поля аналогичен линиям E волны Зоммерфельда в металлической ленте [7]. Таким образом, реберная волна может быть получена путем предельного перехода при увеличении ширины щели в щелевой линии и при увеличении ширины одиночной ленты (рис. 3). В обоих случаях щелевая волна или волна Зоммерфельда расщепляется на две волны, распространяющиеся независимо вдоль каждого ребра.

Измерения фазовой скорости реберной волны показали, что она очень близка к скорости света в свободном пространстве, тем не менее реберная волна является медленной поверхностной волной. Измерения длины волны в свободном пространстве с помощью волномера резонансного типа и длины волны в линии по картине стоячих волн не позволяют обеспечить достаточную точность, поэтому коэффициент замедления $U = c/v_{\text{ф}}$ оценивался косвенным путем по распределению E_x в плоскости ленты при $x > 0$ (рис. 2). При $x/\lambda < 0,25$ закон нарастания напряженности поля при приближении к ребру отличается от закона вида $x^{-1/2}$ из-за конечной разрешающей способности зонда. В области $0,25 < x/\lambda < 0,75$ зонд регистрирует закон $x^{-1/2}$, далее напряженность поля спадает быстрее, что свидетельствует о поверхностном характере волны. Предполагая, что распределение напряженности поля неоднородной плоской волны описывается законом $E_x = E_0 x^{-1/2} e^{-px}$, получим, что коэффициент замедления $U = (k^2 + p^2)^{1/2}/k = 1,00045$. Такой же порядок коэффициента замедления имеет волна Зоммерфельда, распространяющаяся вдоль круглого медного проводника диаметром 0,05 мм. Следовательно, замедляющие свойства ребра сверхразмерной металлической ленты обусловлены большой кривизной поверхности и высокой плотностью поверхностного тока вблизи ребра, а величина коэффициента замедления определяется в основном толщиной ленты и электрическим состоянием поверхности.

Таким образом, экспериментальное исследование волноведущих свойств сверхразмерной металлической ленты показало, что вдоль каждого ребра ленты распространяется медленная поверхностная волна. Структура поля этой волны аналогична структуре поля щелевой волны в щелевой линии или структуре поля волны Зоммерфельда в узкой ленте. Однако в отличие от щелевой в рассматриваемой реберной волне присутствует продольная компонента вектора напряженности электрического поля, а в отличие от волны Зоммерфельда — продольная компонента вектора напряженности магнитного поля. Это дает основание рассматривать волну, распространяющуюся вдоль ребра металлической ленты, как новый вид распространяющегося электромагнитного поля. Реберная волна обобщает щелевую волну и волну Зоммерфельда и может переходить в них в различных предельных случаях. Высокая степень концентрации электромагнитного поля исследуемой волны вблизи ребра сверхразмерной ленты и открытый характер линии передачи свидетельствуют о перспективности использования ленты для построения на ее основе интегральных схем миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с активными элементами.

Институт радиопизики и электроники
Академии наук УССР, Харьков

Поступило
30 X 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Cohn S.B. — IEEE Trans., 1969, MTT-17, № 10, p. 768–778.
2. Mariani E.A., Heingman C.P., Agrios J.P., Cohn S.B. — Ibid., № 12, p. 1091–1096.
3. Седых В.М. Полосковые линии и устройства сверхвысоких частот. Харьков: Вища шк., 1974. 276 с.
4. Федоров А.Н., Левица Н.Н., Шукина Г.С. — Радиотехника и электроника, 1981, т. 26, № 7, с. 1414–1419.
5. Федоров А.Н., Левица Н.Н., Хаметова Н.А. — Там же, 1983, т. 28, № 7, с. 1284–1292.
6. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны М.: Сов. радио, 1957. 483 с.
7. Крыжановский В.В. В кн.: Физика и техника мм- и субмм-волн. Сб. науч. тр. Киев: Наук. думка, 1983, с. 146–149.
8. Андренко С.Д., Крыжановский В.В., Носич А.И., Шестопалов В.П. — Радиотехника и электроника, 1983, т. 28, № 5, с. 888–893.
9. Андренко С.Д., Беляев В.Г., Девятков Н.Д., Шестопалов В.П. — ДАН, 1979, т. 247, № 1, с. 73–76.
10. Носич А.И., Шестопалов В.П. — ДАН, 1978, т. 241, № 2, с. 341–344.