

## АНОМАЛЬНЫЕ МОДЫ В ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ ЛИНИИ

Ю.И. Тихов, Г.П. Синявский,  
Ю.М. Синельников

Исследованию волноводно-щелевых линий передачи (ВШЛ) уделяется большое внимание в связи с возможностью их использования в интегральной технологии миллиметрового диапазона. В настоящее время детально изучены свойства нормальных гибридных собственных мод ВЩЛ. Однако, в ВЩЛ могут существовать также аномальные моды, к которым относятся так называемые „обратные“ волны, у которых фазовая и групповая скорости имеют противоположные направления, и „комплексные“ волны, имеющие комплексные постоянные распространения даже при отсутствии диссипации энергии [1]. В работе [2] численно исследовались ВШЛ с бесконечно тонкими гребнями. При этом авторы обнаружили, что в случае толстых подложек с большими значениями диэлектрической проницаемости  $\epsilon > 10$ , которые на практике не используются, возможно существование аномальных мод. Однако, как будет показано ниже, и в случае типичных для ВШЛ толщин и материалов подложки  $\epsilon = 2.2; 3.8$  возможно существование аномальных мод, в том числе обратных.

В настоящей работе по модели, учитывающей технологические особенности реальных конструкций ВЩЛ (продольный паз для крепления подложки в экранирующем волноводе и конечная толщина гребней) проведен электродинамический анализ с целью поиска аномальных мод в типичных для практики случаях. На рис. 1 показано поперечное сечение односторонней ВЩЛ. Алгоритм анализа на основе метода частичных областей с учетом краевой особенности поведения поля приведен в работе [3], где исследовалась лишь нормальная квази- $H_{10}$  мода. На рис. 2 показан пример зависимости нормированных постоянных распространения  $\gamma_a$  гибридных

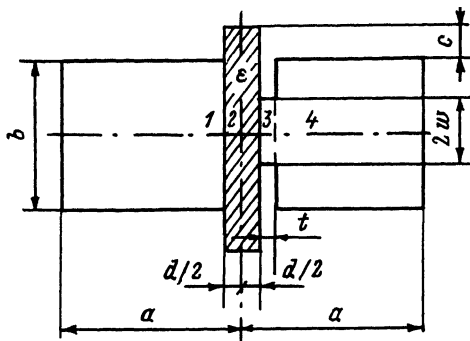


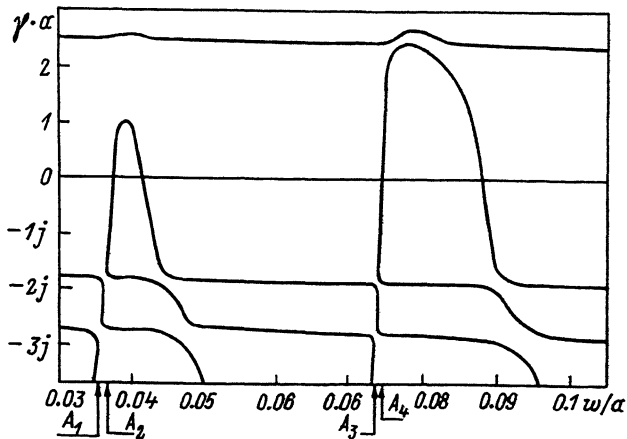
Рис. 1.

ных  $HE$ -мод от величины  $w/a$  для ВЩЛ с параметрами:  $2a = 7.2$ ;  $b = 3.4$ ;  $d = 0.5$ ;  $t = 0.02$ ;  $c = 0.35$  мм;  $\epsilon = 2.2$ ; на частоте 30 ГГц. Зависимость компонент электромагнитного поля волны от продольной координаты  $z$  принята в виде  $\exp(-j\gamma z)$ . Точность расчетов здесь не хуже 0.5%. Видно, что в диапазонах изменения отношения  $w/a$ : 0.0375–0.0413 и 0.0744–0.0878, соответствующих типичным размерам щели ВЩЛ, помимо действительных собственных значений распространяющейся основной квази- $H_{10}$  моды имеют место и другие чисто действительные значения. Обнаруженная аномальность поведения дисперсионных кривых при традиционно одномодовой частоте объясняется особенностями структуры электромагнитного поля гибридных волн. При определенных размерах ВЩЛ парциальные потоки активной мощности вдоль оси волновода через частичные области поперечного сечения (1 – 4 на рис. 1) могут быть направлены в противоположные стороны. Преобладание обратного по отношению к фазовой скорости потока мощности над прямым и приводит к образованию обратной волны [1]. Парциальные потоки активной мощности вычислялись по формуле:

$$P_i = 0.5 \int_{S_i} [EH^*]_z ds,$$

где  $E$  и  $H$  – напряженности электрического и магнитного поля волны,  $S_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) – площадь частичной области поперечного сечения линии. В таблице приведены значения относительной плотности  $Q_i$  передаваемой мощности по сечению исследуемой ВЩЛ для волн, соответствующих собственным значениям  $\gamma$  при различной ширине щели  $w$ , где:

$$Q_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^4 |P_i|}.$$



Т а б л и ц а

Рис. 2.

$\omega/a$	$\gamma a$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$\sum_{i=1}^4 Q_i$
0.0350	2.5293	0.1327	0.3715	0.0467	0.4491	1.0000
0.0385	0.9647	0.0067	-0.4542	-0.3286	-0.2105	-0.9866
	2.5429	0.1338	0.3688	0.0196	0.4778	1.0000
0.0395	0.9868	0.0118	-0.4634	-0.3183	-0.2065	-0.9764
	2.5402	0.1325	0.3674	0.0205	0.4796	1.0000
0.0405	0.7652	0.0178	-0.4731	-0.3056	-0.2035	-0.9644
	2.5352	0.1318	0.3664	0.0236	0.4782	1.0000
0.0450	2.5128	0.1365	0.3627	0.0297	0.4711	1.0000

На рис. 2 в интервалах  $\omega/a$   $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  можно видеть квазипересечение дисперсионных кривых, соответствующих различным типам запердельных мод. Причем в узком диапазоне изменения размера щели наблюдается „исчезновение“ собственных значений пары запердельных мод из области чисто мнимых значений. Это происходит, например, в интервалах  $\omega/a$ :  $A_1$  (0.3519–0.03598)  $A_2$  (0.03605–0.03654),  $A_3$  (0.07306–0.07325),  $A_4$  (0.07352–0.07364). В этих диапазонах параметров линии передачи возникают пары комплексных мод, природа которых исследована в работах [1, 2]. Мы отметим лишь то, что эта пара комплексных волн сильно связана энергетически, и в целом не переносит активной мощности.

Аналогичное явление возникает при возникновении аномальных мод наблюдалось также при исследовании других типов ВЩЛ, например двусторонней, при типичных для практики параметрах линии и частотах. Обратные моды во всех случаях наблюдались в распространяющемся режиме лишь совместно с нормальной основной квази- $H_{10}$  волной, что при эксперименте может проявляться в виде появления в регулярной линии передачи „отраженных“ потоков мощности.

В заключение отметим, что аномальные моды весьма критичны к размеру щели ВЩЛ. Так, увеличение либо уменьшение щели на 10–15 % позволяет обычно уйти из области описанных эффектов, когда они нежелательны. Это приводит к незначительному изменению волнового сопротивления и коэффициента замедления основной моды ВЩЛ.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Веселов Г.И., Раевский С.Б. М.: Радио и связь, 1988. 248 с.
- [2] Omar A.S., Schünemann K. // IEEE Trans. 1985. V. MTT-33. N 12. P. 1313–1322.
- [3] Синельников Ю.М., Синявский Г.П., Тихов Ю.И. // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34. № 3. С. 504–509.

Поступило в Редакцию  
20 декабря 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 6

26 марта 1990 г.

04; 09

© 1990

### ДИССОЦИАЦИЯ МОЛЕКУЛ КИСЛОРОДА В СВЧ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ

Н.Л. Александров, А.М. Кончаков

Появление атомов О в кислородсодержащей газоразрядной плазме приводит к увеличению плотности свободных электронов в результате разрушения отрицательных ионов. Поэтому вопрос о концентрации атомов кислорода непосредственно связан с вопросом о вкладываемой в разряд мощности. Кроме того, диссоциация молекул  $O_2$  представляет интерес как промежуточная стадия при образовании озона и окислов азота. В последнее время эти вопросы являются особенно актуальными для задач экологии, где предлага-