

330 К). Отмеченное выше «волнообразное» изменение зависимости $c_E(T)$ кристалла АТГС+Cu²⁺ в сегнетофазе связано, на наш взгляд, с неоднородностью вхождения примеси Cu²⁺ в кристалл ТГС.

Изменение угла наклона $dc_{\text{пер}}/dT$ в примесных кристаллах ТГС мы интерпретируем как изменение ангармонизма решеточных колебаний при введении в кристалл примесей в процессе роста.

По формулам работы [1] мы оценили степень влияния примесей Cu²⁺ и Cu²⁺+L-α-аланина на зависимости $c(T)$ с использованием феноменологической теории [4] в предположении эквивалентности внутрикристаллических полей смещения, обусловленных введением примесей, и внешних электрических полей. Полученные теоретические зависимости $c(T)$ представлены на рис. 3, а параметры, их характеризующие, — в таблице. Количественное совпадение эксперимента с теорией получается только для кристалла ТГС+Cu²⁺. Зависимость $c(T)$ кристалла АТГС+Cu²⁺ не описывается теорией [4], ибо в этом случае отмечается заметное уменьшение избыточной энергии фазового перехода, связанное с образованием несегнетоактивных диполей.

В заключение отметим, что полученные результаты позволили получить некоторые важные количественные характеристики кристалла ТГС, содержащего примеси Cu²⁺ и Cu²⁺+L-α-аланина: скачок аномальной части теплоемкости в T_c и избыточную энергию фазового перехода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Федорихин В. А. и др. ФТТ, 1980, 22, с. 3544. [2] Тарасевич Е. В. Канд. дис. Минск, 1980. [3] Novik V. K., Gavrilova N. D. Ferroelectrics, 1981, 34, N 1—2, p. 301. [4] Тараскин С. А., Струков Б. А., Мелешина В. А. ФТТ, 1970, 12, с. 1387.

Поступила в редакцию
12.11.82

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1983, Т. 24, № 4

УДК 621.372.8.001.24

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА АНОМАЛЬНО МАЛОГО ЗАТУХАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛН ПЛОСКОГО ГРЕБЕНЧАТОГО ВОЛНОВОДА

В. П. Моденов, А. В. Магатаев

(кафедра математики)

Одним из замечательных свойств гребенчатых волноводов является эффект аномально малого затухания некоторых типов нормальных волн при определенных соотношениях между геометрическими параметрами и длиной волны. Этот эффект был обнаружен экспериментально [1] и исследован численно с помощью ЭВМ в случае круглого [2—4] и прямоугольного [5] гофрированных волноводов, а также аналитически исследован в работе [6] для случая E_{0n} -волн в плоском гребенчатом и H_{mn} -волн в азимутально-гофрированном волноводах. В работе [6] аналитическое исследование затухания электрических волн в плоском гребенчатом волноводе выполнено на основе использования эквивалентного граничного условия импедансного типа и анализа дисперсионного уравнения для поперечных волновых комплексных чисел.

Цель данной работы — численным экспериментом на ЭВМ подтвердить выводы аналитической теории [6] о существовании у рассматриваемых нормальных волн режимов аномально малого затухания.

Рассмотрим нормальные E -волны двумерного гребенчатого волновода (рис. 1), имеющие, как известно, компоненты поля $H_y(x, z)$, $E_x(x, z)$, $E_z(x, z)$. Заменяем данный волновод гладкостенным с эквивалентным граничным условием импедансного типа

$$E_z - Z^e H_y|_{x=0} = 0,$$

где поверхностный импеданс Z^e выражается по формуле (7) работы [6] через W_0 — волновое сопротивление свободного пространства,

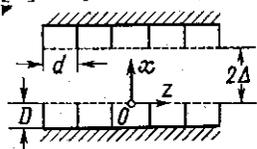


Рис. 1

k — продольное волновое число, d — период гребенки, D — высоту гребенки, Δ — ширину эквивалентного гладкостенного волновода ($k\Delta \gg \pi/2$).

Будем рассматривать симметричные по x волны. Дисперсионное уравнение для поперечных волновых комплексных чисел $\kappa = z/\Delta$ в этом случае имеет вид [6].

$$z \operatorname{tg} z = h, \quad (1)$$

где комплексный параметр $h = \bar{h} + i\bar{h}$ выражается через поверхностный импеданс: $h = iZ^e/k\Delta W_0$. Вычисление комплексных корней $z = \bar{z} + i\bar{z}$ трансцендентного уравнения (1) проводим в комплексной плоскости итерационным методом Ньютона с выбором начальных приближений методом дифференцирования по параметру (см., например, [7, с. 342—343]), который позволяет свести исходную задачу о нахождении комплексных корней трансцендентного уравнения к решению задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения, в данном случае с алгебраической правой частью [8]. Метод Ньютона позволил вычислить действительные и мнимые части комплексных корней уравнения (1) с точностью 10^{-5} — 10^{-6} .

Практический интерес представляет нахождение комплексных корней трансцендентного уравнения (1), расположенных вблизи действительной оси: $|\bar{z}| \ll |\bar{z}|$ (случай быстрых собственных волн). В этом случае, если действительные корни уравнения

$$\bar{z} \operatorname{tg} \bar{z} = \bar{h}$$

известны, то для вычисления мнимых частей искомых корней уравнения (1) имеем аналитическую формулу

$$\bar{z} \cong \bar{h} \bar{z} / (\bar{z}^2 + \bar{h}^2 + \bar{h}).$$

На основе данного алгоритма был проведен ряд расчетов.

На рис. 2 приведен график зависимости добротности $Q = \bar{z}/2\bar{z}$ полученный для волны E_{01} вблизи частоты отсечки для различных значений продольного волнового числа ($\Delta = 1$). Как видно из графика, зависимость добротности Q от отношения D/d обратно пропорциональная. Следовательно, в рассматриваемой области изменения частоты потери в гребенчатом волноводе больше, чем в гладкостенном, что согласуется с выводами аналитической теории [6].

Наибольший практический интерес представляет случай, когда мнимая часть импеданса велика: $\operatorname{tg} kD \gg 1$, что соответствует случаю, когда действительная часть \bar{h} намного больше мнимой части h . На рис. 3 приведены для этого случая зависимости мнимой части минимального по модулю комплексного корня \bar{z} от величины продольного волнового числа для различных значений высоты гребенки. Исследование час-

тотной зависимости величины \bar{z} для гладкостенного волновода шириной $2l$ показывает, что эта величина с увеличением частоты пропорционально увеличивается, т. е. чем дальше рабочая частота отстоит от частоты отсечки, тем больше потери в гладкостенном волноводе. Как видно из рисунка, в гребенчатом волноводе ($l = \Delta + D$) существует область изменения частоты, где мнимая часть поперечного волнового числа \bar{z} , а следовательно, и постоянная затухания $\text{Im} \sqrt{k^2 - (z/\Delta)^2}$ весьма малы (режим аномально малого затухания). Это подтверждает

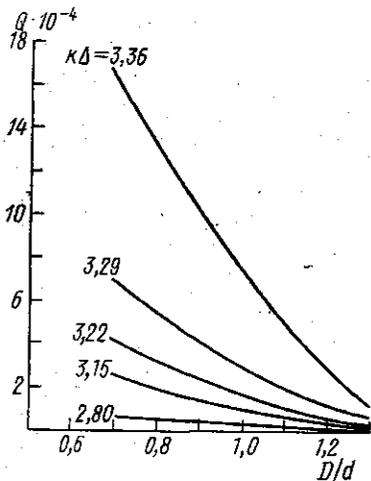


Рис. 2

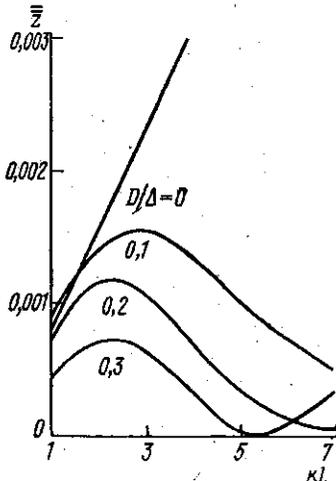


Рис. 3

вывод аналитической теории о том, что гребенчатый волновод может дать значительный выигрыш в потерях по сравнению с гладкостенным волноводом с конечной проводимостью стенок. Полученным результатам можно дать физическую интерпретацию с позиций концепции Бриллюэна [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Oliver A. D., Clarricoats P. J. B., Shong S. L. Electron. Letters, 1973, 9, N 18, p. 424.
- [2] Clarricoats P. J. B., Saha P. K. Electron. Letters, 1970, 6, N 12, p. 370.
- [3] Clarricoats P. J. B., Oliver A. D., Shong S. L. Proc. IEEE, 1975, 122, N 11, p. 1173.
- [4] Альховский Э. А., Ильинский А. С. В кн.: Прямые и обратные задачи теории антенн. М.: Изд-во МГУ, 1976, с. 176.
- [5] Радионов А. А., Раевский С. Б. Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника, 1977, 20, № 5, с. 69.
- [6] Слепян Г. Я. Радиотехн. и электроника, 1981, 26, № 9, с. 1833.
- [7] Михлин С. Г. Численная реализация вариационных методов. М.: Наука, 1966.
- [8] Моденов В. П. Вестн. Моск. ун-та. Сер. Вычисл. матем. и киберн., 1981, № 4, с. 43.

Поступила в редакцию
16.11.82