РАСЧЕТ ЕМКОСТНОЙ МАТРИЦЫ ПЛАНАРНЫХ ЛИНИЙ

И. М. Вершинин
Югорский государственный университет
г. Ханты-Мансийск

Проектирование и анализ устройств с полосковыми линиями передач в Т-приближении сопровождается определением емкостной матрицы *С*, которая находится в результате решения электростатической краевой задачи, удовлетворяющей уравнению Лапласа. При ее решении широко используются метод конформных отображений (КО) [1], сеточный метод (СМ) [2, 3], метод функции Грина, метод Монте-Карло. Усложнение структур линий приводит к потребности комбинации методов с использованием их отдельных достоинств. Ниже, на примере связанных полосковых линий с планарными экранами, показанными на рисунке 1, предложено провести расчет емкости численным СМ с предварительным привлечением аналитических преобразовании на основе КО. Непосредственное применение СМ здесь затруднено из-за «открытости» структур и сильной неравномерности электрического поля по сечению (большая концентрация в зазоре), а с другой стороны подобрать КО, приводящее к простому виду формы электрического поля, например, плоскопараллельному, не удается. КО преобразует структуру к «замкнутому» виду с одновременным «растяжением» зазоров. На втором этапе с помощью СМ определяются погонные плотности зарядов на проводниках с последующим расчетом матрицы С.

Формулы преобразования для первой группы структур: $W=F(Z/\omega,k)$; $Z=\omega\cdot sn(W,k)$, для второй – $W=F[(Z/\omega)^{0.5},k]$; $Z=\omega\cdot sn^2(W,k)$.

Поделим структуру копланарной линии 1 вдоль границы раздела диэлектриков с ε_2 и ε_3 (по оси *X)* на две части и с помощью КО $W=U+iV=F(Z/\omega,k)$ преобразуем полуплоскости в прямоугольники. «Сшивая» их по линии раздела диэлектриков в зазорах копланарной линии, получим расчетную модель структуры для СМ. В силу симметрии достаточно определить емкость прямоугольника, ограниченного «электрическими» стенками размером $2K$ и «магнитными» размером K'.

Выше и на рисунке 1 приняты обозначения: $F(Z/\omega, k)$ — эллиптический интеграл 1-го рода с модулем $k = \omega^2/(\omega+\delta)^2$; K,K' — полные эллиптические интегралы; $k'=1-k$ — дополнительный модуль.

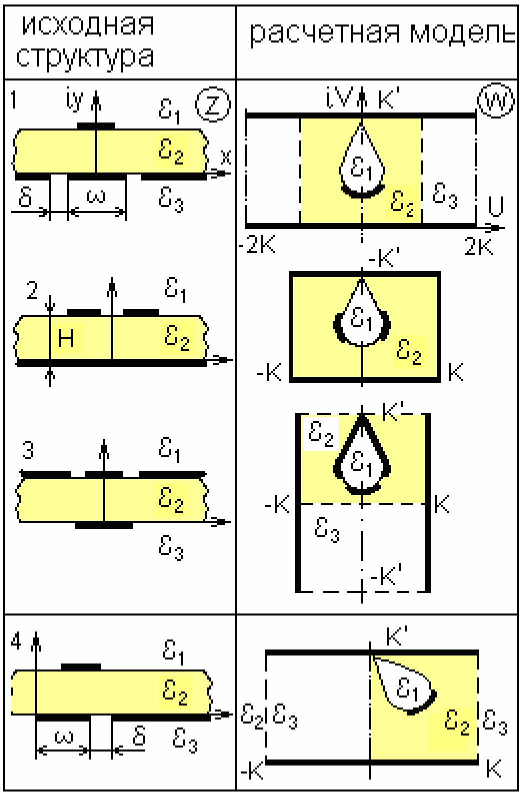

Рисунок 1 – Структуры планарных полосковых линий

При переходе к сеточной модели кривая $V(U)$ границы раздела диэлектриков с ε_1 и ε_2 заменяется аппроксимирующей ломаной $I(J)$. На рис. 2а для $k = 0,695$ ($K = 2,07$, $K' = 1,716$) показан фрагмент расчетной модели при разной толщине подложки H/ω. Поиск $I(J)$ осуществляется по следующему принципу. Начальный узел $W_1 = 0 + iK'$. Для задания направления поиска берется второй узел $W_2 = h + iK'$ где h – шаг квадратной сетки. Определение координат последующего $N+1$ узла реализуется по правилу, представленному схематично на рисунке 2, а, когда значения трех соседних узлов сетки пересчитываются на плоскость Z, где выбирается узел $W_{N+1}= Jh + iIh$, лежащий ближе к прямой $Y = H$.

Процесс повторяется пока $I(J)$ не выйдет на ось iV. Для пересчета координат узлов используется обратное преобразование [4]:

$$Z = \omega \cdot \sin(U + iV, k) = \omega \frac{s \cdot d_1 + ic \cdot d \cdot s_1 \cdot c_1}{1 - s_1^2 \cdot d^2} =$$

$$= X(U,V) + iY(U,V),$$

где $s = sn(U, k)$; $s_1 = sn(V, k')$; $c = cn(U, k)$; $c_1 = cn(V, k')$; $d = dn(U,k)$; $d_1 = dn(V, k')$ – эллиптические функции Якоби.

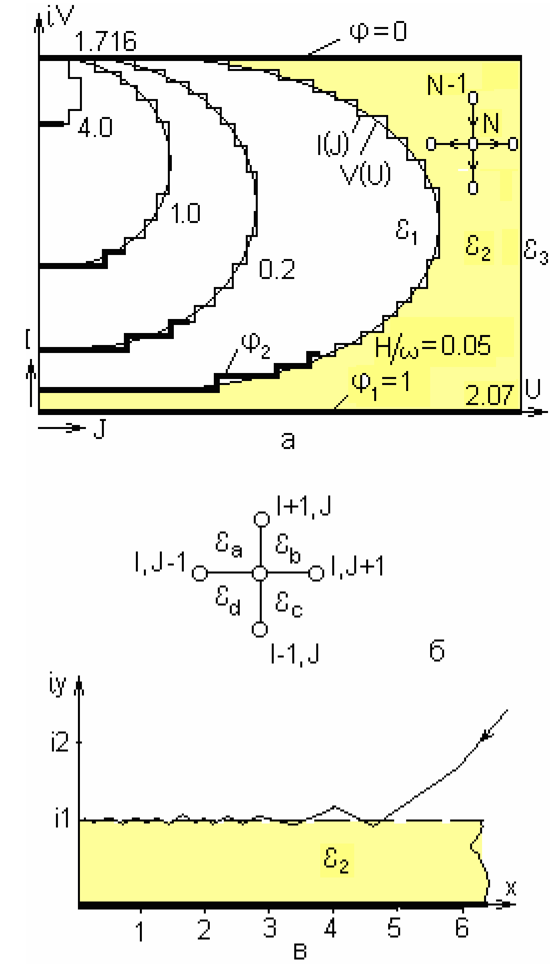

Рисунок - 2. Расчетная сеточная модель копланарной линии

Функции Якоби находятся с помощью ТЭТа-функций, представляемых быстросходящимися рядами. Так как в алгоритме поиска координат узлов $I/(J)$ используется информация лишь по относительному расположению трех точек в локальной области плоскости W, то можно ограничиться двумя членами ряда. Качество аппроксимации для случая $H/\omega = 1$ дано на рисунке 2, в. При помощи выражения $X(U,V)$ определяется трансформация размеров верхнего проводника при отображении. Для примера на рисунке 2, а его ширина взята в 2 раза меньше нижнего. Кривую $V(U)$ находим по выражению интеграла с комплексной амплитудой [4], преобразованному для данного случая:

$$F(Z/\omega,k) = F(\tilde{X} + i\tilde{Y}, k) = F(L, k) + iF(M, k')$$

$$M = (1+E)^{-0.5};\ L = (1+P)^{-0.5};$$

$$E = B \cdot k/(k'P - B);\ P = A + \sqrt{A^2 + B};$$

$$A = (t^2 k + tk' - \tilde{X}^2 - \tilde{X}^2 k')/2\tilde{X}^2;$$

$$B = k'(t - \tilde{X}^2)/\tilde{X}^2;\ t = R - \sqrt{R^2 + \tilde{X}^2};$$

$$R = (\tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2 + 1)/2.$$

В сеточном аналоге уравнения Лапласа учитывается диэлектрическое окружение узла [2, 3], которое меняется в зависимости от его положения на *I(J)*. Так, ε_B примет значения ε_1 или ε_2 (см. рисунок 2). Ситуации учитываются кодировкой узлов при поиске *I(J)* и закладываются в массив размерностью *K/h* на *K'/h*, что одновременно характеризует и пространственное положение кривой.

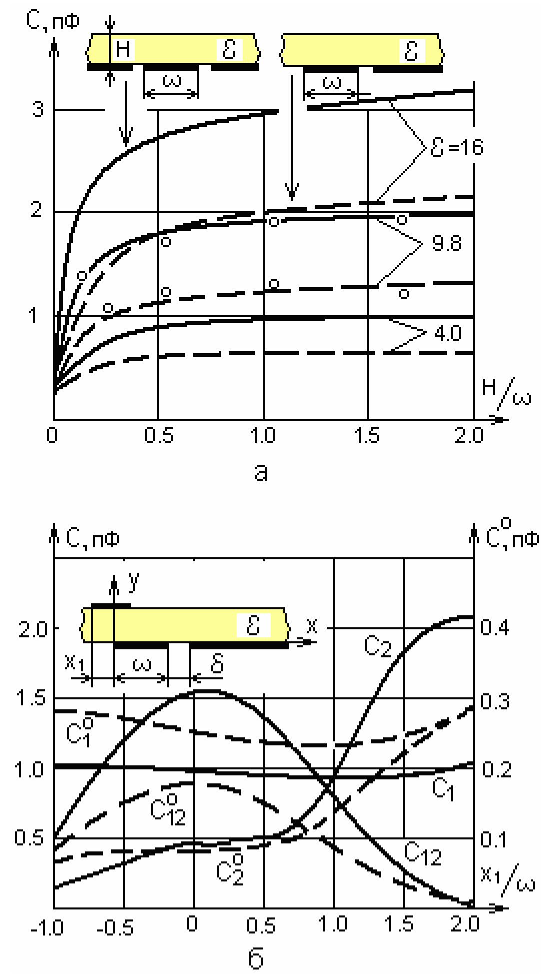

Рисунок 3 – Результаты расчета емкостей: а – одиночных КЛ и НКЛ при отношении зазора к ширине проводника 0,1 в зависимости от толщины подложки с $\varepsilon_2 = \varepsilon$; б – связанных линий при $\varepsilon_2 = 9{,}8$ и $\varepsilon_2 = 1$ (*C* и *C°* соответственно)

При четном возбуждении $\varphi_1 = 1$ В на нижнем проводнике и $\varphi_2 = 1$ В на верхнем – заряд первого проводника Q_1 (контур интегрирования по линии $l = 2$) и суммарный заряд для проводников Q_Σ (контур интегрирования по линии K'/h -1) определяет собственные емкости $C_1 = Q_1$ и $C_2 = Q_\Sigma - C_1$. Обозначая заряд на первом проводнике Q'_1 при возбуждении $\varphi_1 = 1$ В и $\varphi_2 = O$ В, найдем взаимную емкость $C_{12} = Q'_1 - C_1$.

Результаты расчетов первой и четвертой структур даны на рисунке 3. В отсутствии проводника на верхней стороне подложки с $\varepsilon_2 = \varepsilon$ на рис. 3а приведены характеристики для копланарной линии (КЛ) и несимметричной копланарной линии (НКЛ) при соотношении зазора к ширине проводника 0,1.

В исходной структуре 4 НКЛ разрез сделан по положительной части оси *X.* Модуль $k = \omega/(\omega - \delta)$. Анализ показывает, что НКЛ обеспечивает меньшее замедление Т-волны, реализует более высокие волновые сопротивления или при том же сопротивлении имеет меньший зазор. Последнее обстоятельство важно для снижения управляющих напряжений в устройствах с сегнетоэлектрической пленкой.

Наличие ступенчатой кривой *I(J)* дает возможность в предположении существования плоского поля в прямоугольнике оценить емкость одиночной линии методом трапеций, минуя СМ. Для $\varepsilon = 9{,}8$ на том же рисунке в виде кружков даны результаты, показывающие близкое совпадение. Кривые рисунка 3, б отражают расчет связанных линий структуры 4 при смещении верхнего проводника шириной $\omega_2/\omega = 0{,}5$ на подложке толщиной $H/\omega = 0{,}5$ с $\varepsilon_2 = 9{,}8$ при $\delta/\omega = 0{,}1$. Емкости, помеченные индексом 0, относятся к случаю с однородным заполнением ($\varepsilon = 1$), необходимому для расчета фазовых скоростей нормальных типов волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С, Стру нский М. Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергия, 1981. 288 с.

2. Бреннер К. Расчет СВЧ интегральных схем с помощью ЭВМ. – Сб. Машинный расчет интегральных схем. – М.: Мир, 1971. 380 с.

3. Вершинин И.М. Комбинированный метод расчета микрополосковых линий передач. Сб. научных статей-Образование, наука и техника, ЮГУ. – Ханты-Мансийск: 2009. 234-237 с.

4. Справочник по специальным функциям. / Под ред. М. Абрамовица, И. Стигана. – М.: Наука, 1979. 832 с.