

В.А. АНТОНОВА, канд. техн. наук, **В.Н. БОРИЩЕВ**, д-р техн. наук,
А.П. РЕЗНИК, (ГП НИТИ приборостроения, г. Харьков)

РАСЧЕТ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОПЛАНАРНО СВЯЗАННЫХ ЛИНИЙ ПЛЕНОЧНОГО КАБЕЛЯ

В статті приведена розроблена математична модель для розрахунку хвильового опору сигнального кабелю, що враховує скінченну ширину провідників багатопшарової копланарно-зв'язаної смужкової лінії та результати досліджень залежності хвильового опору від геометричних розмірів провідників, зазорів між ними і товщини покривної плівки. Показана можливість отримання оптимальних хвильових опорів ліній передач кабелю до 45+50 Ом.

In paper the designed mathematical model for calculation of a characteristic impedance of a signal cable taking into account finite width of conductors of multilayer coplanar coupled lines, and outcomes of researches of dependence of a characteristic impedances from geometrical sizes of conductors, clearances between them and thickness of a covering film is reduced. The possibility of obtaining of optimal characteristic impedance of transmissions lines is shown.

Современные методы обработки и передачи данных регистрирующих устройств внутренних трековых систем коллайдеров привели к разработке детекторных модулей, обеспечивающих регистрацию событий, усиление сигнала, формирование и преобразование кодов в непосредственной близости от детектора, и пленочных кабелей, осуществляющих передачу сигнала устройствам оконечной электроники, расположенных вне зоны регистрации и идентификации элементарных частиц [1]. Гибкие пленочные кабели (ПК) на основе лакофольговых полиимидных диэлектриков обеспечивают необходимые электрические характеристики и обладают достаточной механической прочностью, необходимой в процессе сборки и регулировки регистрирующих устройств.

Использование копланарно связанных полосковых линий (КСПЛ) упрощает создание помехозащищенных сигнальных кабелей, сочетающих гибкость их конструирования и простоту сопряжения с электронными устройствами. Кабель может быть выполнен в виде одно- и трехслойной конструкции на основе фольгированного полиимида ФДИ-А-50 с алюминиевой металлизацией и расположенного сверху нее полиимидного адгезивного материала ПА [2].

Анализ характеристик КСПЛ осуществляется как квазистатическими, так и волновыми методами [3-5]. В работе [5] выполнен квазистатический анализ для линий передачи с помощью конформных преобразований в предположении, что толщина подложки конечна, а ширина проводников возврата тока неограниченна. В разрабатываемых нами конструкциях сигнальных кабелей детекторных модулей проводники КСПЛ имеют

конечную ширину, и в связанных линиях производится противофазное возбуждение сигнала.

Цель данной работы: разработка математической модели для расчета волнового сопротивления кабеля, учитывающей конечную ширину проводников многослойной КСПЛ, и проведение исследований зависимости волнового сопротивления от геометрических размеров проводников, зазоров между ними и толщины покрывной пленки.

Практический интерес представляет исследование зависимости волнового сопротивления ПК на основе фольгированного полиимида ФДИ-А-50 и покрывной пленки ПА с учетом технологических ограничений фотолитографического оборудования при изготовлении длинных кабелей (более 120 мм).

1. Математическая модель. Используя квазистатическое приближение, эффективную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{эфф}$, фазовую скорость $v_{фаз}$ и волновое сопротивление Z_0 , согласно [4] можно определить из следующих соотношений:

$$\epsilon_{эфф} = C / C_0; \quad (1)$$

$$v_{фаз} = c / \sqrt{\epsilon_{эфф}}; \quad (2)$$

$$Z_0 = 1 / C v_{фаз}, \quad (3)$$

где C – погонная емкость линии передачи; C_0 – погонная емкость линии передачи при отсутствии диэлектрика; c – скорость света.

Структура КСПЛ с проводниками возврата тока конечной ширины приведена на рис. 1.

Все проводники структуры имеют конечную толщину и обладают низким импедансом. Две связанные линии шириной $(b-a)$ расположены в зазоре $2c$ между проводниками возврата тока и находятся на подложке толщиной h_1 с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_1 . Две связанные линии разделены зазором шириной $2a$. Слой проводников защищен сверху полиимидной покрывной пленкой h_2 с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 , включающей слой адгезива толщиной h_3 с диэлектрической проницаемостью ϵ_3 .

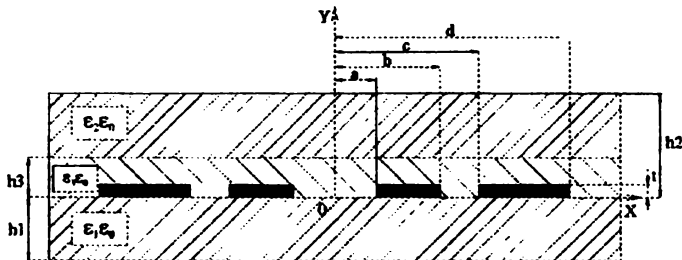


Рис. 1 – Структура многослойной КСПЛ

Описанная структура обеспечивает два основных режима распространения сигналов – четный и нечетный. Общая емкость на единицу длины определяется как сумма частичных емкостей:

$$C_{\text{кспл}} = C_0 + C_1 + C_2 + C_3, \quad (4)$$

где C_1, C_2, C_3 – емкости линий передачи в присутствии диэлектриков толщиной h_1, h_2, h_3 с соответствующими диэлектрическими проницаемостями $(\epsilon_1 - 1), (\epsilon_2 - 1), (\epsilon_3 - \epsilon_2)$.

Анализ нечетного режима распространения сигналов можно упростить путем размещения “электрической стенки” в центре диэлектрической структуры. Частичная емкость области занятой диэлектриком рассчитывается с помощью ряда конформных преобразований, приведенных на рис. 2.

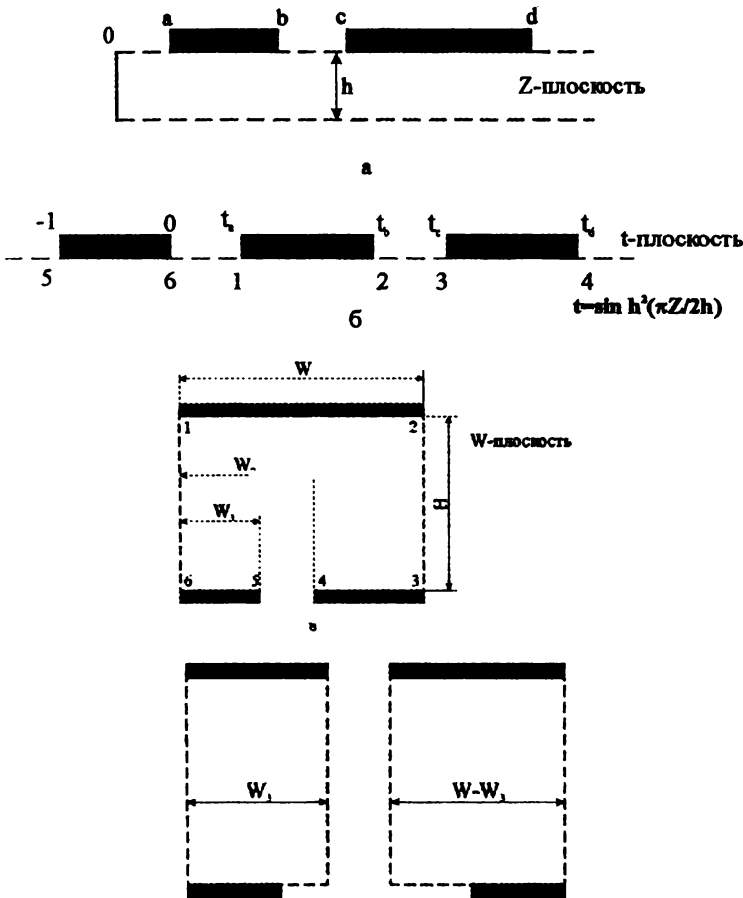


Рис. 2 – Конформные преобразования к расчету частичной емкости

Конфигурация структуры на рис. 2,а преобразуется в структуру на рис. 2,в с помощью следующих выражений:

$$\frac{W}{H} = \frac{K(k_{c1})}{K'(k_{c1})} = \alpha; \quad (5)$$

$$\frac{W_1}{W} = \frac{F\left(\arcsin\left(\frac{th(\pi b/(2h))}{th(\pi c/(2h))}\right), k_{c1}\right)}{K(k_{c1})} = \beta_1; \quad (6)$$

$$\frac{W_2}{W} = \frac{F\left(\arcsin\sqrt{\frac{\sinh^2(\pi b/2h) \cdot \sinh^2(\pi d/(2h)) - \sinh^2(\pi c/(2h))}{\sinh^2(\pi c/2h) \cdot \sinh^2(\pi d/(2h)) - \sinh^2(\pi b/(2h))}}, k_{c1}\right)}{K(k_{c1})} = \beta_2; \quad (7)$$

$$k_{c1}^2 = \frac{\sinh^2(\pi c/(2h)) \cdot \left[\sinh^2(\pi b/(2h)) - \sinh^2(\pi d/(2h))\right]}{\sinh^2(\pi b/(2h)) \cdot \left[\sinh^2(\pi c/(2h)) - \sinh^2(\pi d/(2h))\right]}, \quad (8)$$

где $F(\varphi, k)$ – неполный эллиптический интеграл 1-го рода.

Емкость структуры на рис. 2,в можно рассматривать как сумму двух емкостей, показанных на рис. 2,г. В результате погонная емкость КСПЛ может быть описана следующими соотношениями:

$$C_0 = 2\varepsilon_0 \cdot \frac{K(k_{01})}{K'(k_{01})}; \quad (9)$$

$$C(\varepsilon) = (\varepsilon - 1)\varepsilon_0 \cdot \left(\frac{K(k_{02})}{K'(k_{02})} + \frac{K(k_{03})}{K'(k_{03})}\right); \quad (10)$$

$$k_{01}^2 = \frac{c^2}{b^2} \cdot \frac{(b^2 - a^2)}{(c^2 - a^2)}; \quad (11)$$

$$\frac{F(\arcsin(k_{02}/k_{c2}), k_{c2})}{K(k_{c2})} = \frac{W_1}{W_3} = \frac{\beta_1}{\beta_3}; \quad (12)$$

$$\frac{F(\arcsin(k_{03}/k_{c3}), k_{c3})}{K(k_{c3})} = \frac{W - W_2}{W - W_3} = \frac{1 - \beta_2}{1 - \beta_3}; \quad (13)$$

$$\frac{K(k_{c2})}{K'(k_{c2})} = \frac{W_3}{H} = \alpha\beta_3; \quad (14)$$

$$\frac{K(k_{c3})}{K'(k_{c3})} = \frac{W - W_3}{H} = \alpha(1 - \beta_3); \quad (15)$$

$$\beta_3 = \frac{W_3}{W} = \frac{W_1 + W_2}{2} = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}. \quad (16)$$

При подстановке (8) и (9) в формулу (1) получим выражение для расчета $\varepsilon_{\text{эфф}}$ трехслойной модели КСПЛ с учетом диэлектрических свойств используемых материалов:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{эфф}} = 1 + \frac{(\varepsilon_1 - 1)}{2} \cdot \frac{K'(k_{01})}{K(k_{01})} \cdot \left[\frac{K(k_{02}^1)}{K'(k_{02}^1)} + \frac{K(k_{03}^1)}{K'(k_{03}^1)} \right] + \frac{(\varepsilon_2 - 1)}{2} \cdot \frac{K'(k_{01})}{K(k_{01})} \cdot \left[\frac{K(k_{02}^2)}{K'(k_{02}^2)} + \frac{K(k_{03}^2)}{K'(k_{03}^2)} \right] + \\ + \frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)}{2} \cdot \frac{K'(k_{01})}{K(k_{01})} \cdot \left[\frac{K(k_{02}^3)}{K'(k_{02}^3)} + \frac{K(k_{03}^3)}{K'(k_{03}^3)} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Волновое сопротивление многослойной КСПЛ на основе (1)-(3) определяется выражением:

$$Z_0 = 1 / \left(\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}} \cdot C_0 \cdot 3 \cdot 10^8 \right). \quad (18)$$

Приведенные формулы получены в предположении бесконечно малых толщин полосковых проводников. Практически металлизированный слой имеет конечную толщину t , которая влияет на характеристику линии передачи. Влияние толщины полосковых проводников на волновое сопротивление компланарно связанных линий передачи учитывает введение эффективных значений ширины полосок и зазоров.

Для КСПЛ, согласно [6], можно записать:

$$a_{\text{эфф}} = a - \frac{\Delta_1}{2}, \quad b_{\text{эфф}} = b + \frac{\Delta_1}{2}, \quad c_{\text{эфф}} = c - \frac{\Delta_2}{2}, \quad d_{\text{эфф}} = d + \frac{\Delta_2}{2}; \quad (19)$$

где

$$\Delta_1 = \left(\frac{1,25 \cdot t}{\pi} \right) \cdot \left[1 + \ln \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot (b - a)}{t} \right) \right]; \quad \Delta_2 = \left(\frac{1,25 \cdot t}{\pi} \right) \cdot \left[1 + \ln \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot (d - c)}{t} \right) \right].$$

Расчет величины волнового сопротивления одно- и двухслойной конструкции кабеля с различными изолирующими материалами произведен при использовании следующих исходных данных:

- суммарная ширина КСПЛ равна $2d=7000$ мкм;
- величина зазора между проводниками связанных линий и проводниками возврата тока (d-c) равна величине зазора между связанными проводниками $2a$;
- слой диэлектрика ФДИ-А-50 имеет толщину $h_1=20$ мкм и диэлектрическую проницаемость $\epsilon_1=3,5$;
- слой диэлектрика защитной ленты ПА, расположенной сверху слоя трасс, имеет минимальную толщину $h_2=50$ мкм, максимальную – $h_2=125$ мкм, и диэлектрическую проницаемость $\epsilon_2=3,5$;
- слой адгезива пленки ПА, выполненный на эпоксидно-каучуковой основе, имеет после прессования толщину, равную $h_3=15$ мкм, и диэлектрическую проницаемость $\epsilon_3=4,0$;
- толщина полосковых проводников линии передачи составляет 30 мкм.

2. Результаты расчета волновых сопротивлений. Рассчитанные значения волновых сопротивлений для однослойной Z_{01} и трехслойной конструкции кабеля с использованием ленты ПА минимальной толщины – $Z_{03\text{мин}}$ и максимальной толщины $Z_{03\text{макс}}$ для фиксированных значений ширины (b-a) проводников при изменении зазора между проводниками приведены в табл.1. Диапазон изменения зазоров между проводниками ограничен, с одной стороны, технологическими возможностями фотолитографического оборудования при изготовлении длинных кабелей (~150 мкм), с другой – конструктивными соображениями минимизации занимаемого объема (~400 мкм).

Таблица 1

Волновое сопротивление КСПЛ с различной шириной сигнальных проводников

№	Величина зазора между проводниками, мкм	Волновое сопротивление, Ом								
		Z_{01}			$Z_{03\text{мин}}$			$Z_{03\text{макс}}$		
		Ширина сигнального проводника (b-a), мкм								
		150	250	350	150	250	350	150	250	350
1	150	52,4	47,1	43,1	42,7	38,6	35,6	42,8	38,1	35,0
2	200	58,9	52,6	47,5	47,2	42,5	39,0	48,3	42,7	38,7
3	250	63,7	56,8	51,0	49,9	44,6	40,9	52,5	46,0	41,6
4	300	67,5	60,4	55,5	52,1	47,0	43,6	55,9	49,4	45,4
5	350	70,7	63,9	58,2	54,1	49,2	45,4	59,0	52,0	47,2
6	400	73,8	66,3	60,8	56,0	50,6	47,0	60,3	53,0	48,5

3. Обсуждение результатов. На основе анализа полученных результатов можно сформулировать следующие закономерности:

для одной и той же ширины сигнального проводника однослойная конструкция кабеля по сравнению с трехслойной обладает большим волновым сопротивлением;

увеличение зазора между проводниками с 150 до 400 мкм приводит к увеличению волнового сопротивления однослойной конструкции кабеля в 1,4 раза;

увеличение толщины защитного покрытия с 50 до 125 мкм увеличивает вес кабеля в 2 раза и обеспечивает возрастание волнового сопротивления ≤ 4 Ом.

На рис. 3 представлены графические зависимости изменения волнового сопротивления трехслойной модели КСПЛ кабеля от ширины сигнального проводника при фиксированном зазоре между проводниками.

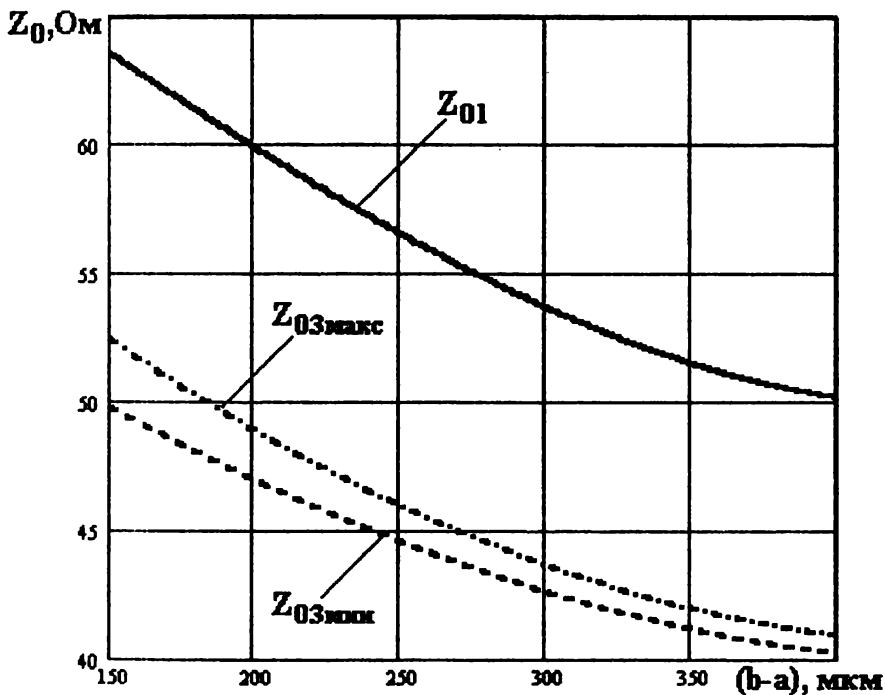


Рис. 3 – Зависимость волнового сопротивления однослойной Z_{01} и трехслойной модели кабеля с защитной пленкой минимальной толщины $Z_{03\text{min}}$ и максимальной толщины $Z_{03\text{max}}$ от ширины сигнального проводника при фиксированном зазоре между проводниками, равном 250 мкм.

Следует обратить внимание на плавное уменьшение волнового сопротивления кабеля при увеличении ширины сигнальных проводников, что должно обеспечить незначительный разброс сопротивления в реальных конструкциях кабеля с возможными отклонениями ширины проводников в ходе технологических операций.

На данном этапе проводятся работы по определению оптимальных характеристик кабелей в составе работающего модуля кремниевого стрипового детектора в проекте "ALICE" (A Large Ion Collider Experiment, CERN) [1].

Выводы. Разработана математическая модель для расчета волновых сопротивлений многослойной КСПЛ сигнального кабеля, учитывающая конечную ширину проводников.

Проведенные исследования зависимости волнового сопротивления сигнального кабеля от геометрических размеров проводников, зазоров между ними и толщины покрывной пленки показали, что защищенные конструкции пленочных кабелей обеспечивают получение волновых сопротивлений линий передач до 45-50 Ом.

Приведенная математическая модель позволяет проводить анализ допустимых отклонений, при которых характеристики сигнального кабеля удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Список литературы: 1. ALICE. Technical Design Report of the Inner Tracking System (ITS). ALICE TDR4, CERN/LHCC 99-12. 18 June 1999. 2. Материалы для производства печатных плат / З.Н. Воробьев, Л.Л. Ушакова, Е.П. Вишнякова, Р.П. Смолина, А.С. Бекмуразова // Технологии и конструирование в электронной радиоаппаратуре. 1993. №2. С.55-57. 3. Проектирование интегральных устройств СВЧ: Справочник / Ю. Г. Ефремов, В. В. Конин, Б. Д. Солганик и др. К.: Техника, 1990. 159с. 4. *Chen E., Chou S.Y.* Characteristics of coplanar transmission lines on multilayer substrates: Modeling and Experiments//IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1997. Vol. 45. №6. P. 939-945. 5. *Cheng K.-K.M.* Analysis and synthesis of coplanar coupled lines on substrates of finite thicknesses // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1996. Vol. 44. №4. P.636-639. 6. *Гутта К., Гарадж Р., Чадха Р.* Машинное проектирование СВЧ устройств. М.: Радио и связь, 1987, 432с.

Поступила в редколлегию 23.05.03