

УДК 621.372.22

И.Е. Сагиева

## Моделирование характеристик микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками сверху

Выполнено моделирование микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками, расположенными в воздухе. Вычислены зависимости погонной задержки и волнового сопротивления от расстояния между ближайшими проводниками. Выявлена широкая область значений расстояния между ближайшими проводниками, обеспечивающая минимальную чувствительность погонной задержки к изменению высоты боковых проводников, что можно использовать для получения стабильной задержки.

**Ключевые слова:** печатные платы, микрополосковая линия, погонная задержка, волновое сопротивление.

С ростом требований к характеристикам радиоэлектронной аппаратуры возникает необходимость воспроизведения линий передачи печатных плат (ПП) со стабильными значениями характеристик погонной задержки ( $\tau$ ) и волнового сопротивления ( $Z$ ). Высокие характеристики печатных плат важны для высокоэффективных миниатюрных узлов, обладающих надежностью, быстродействием, стабильностью электрофизических параметров, электромагнитной совместимостью. Все это привело к необходимости создания моделей линии передачи для расчета  $\tau$  и  $Z$  с учетом новых конструкторско-технологических решений. В связи с этим исследования этих характеристик актуальны.

Одной из основных линий, реализуемых на ПП, является микрополосковая линия (МПЛ) [1]. Предметом повышенного интереса становятся различные модификации МПЛ, например подвешенная и обращенная полосковые линии, позволяющие получить нулевую чувствительность  $\tau$  и  $Z$  к изменению толщины диэлектрических слоев [2]. Подобная закономерность обнаружена в МПЛ, покрытой заземленным проводником [3], экранированной МПЛ [4], а также в МПЛ с боковыми заземленными проводниками, углубленными в подложку [5]. Известен детальный анализ мод и дисперсии в такой линии и её разновидности [6]. В многослойных печатных платах используются разновидности МПЛ, например с полигонами на различных слоях, позволяющие получить стабильное значение погонной задержки [7]. Между тем полезно исследование характеристик МПЛ с заземленными боковыми проводниками только на одном слое, расположенными вблизи границы раздела двух сред.

Цель работы – исследовать зависимости погонной задержки ( $\tau$ ) и волнового сопротивления ( $Z$ ) МПЛ от расстояния между боковыми заземленными проводниками, расположенными в воздухе.

Для достижения указанной цели исследована МПЛ с боковыми заземленными проводниками, расположенными в воздухе (рис. 1). Выбраны неизменными следующие (близкие к типовым) значения параметров поперечного сечения линий: ширина сигнального проводника  $w = 0,3$  мм, толщина сигнального и боковых заземленных проводников  $t = 18$  мкм, ширина боковых проводников  $w_1 = 1$  мм,

толщина диэлектрической подложки  $h = 1$  мм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r = 4,5$ .

В системе TALGAT [8] построена геометрическая модель поперечного сечения линии и методом моментов (при длине сегмента 5 мкм) вычислены матрицы (порядка  $3 \times 3$ ) погонных коэффициентов электростатической индукции с учетом диэлектрика и без него.

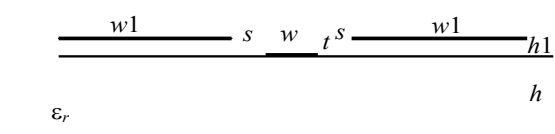


Рис. 1. Поперечное сечение МПЛ с боковыми заземленными проводниками сверху

Из матриц брались значения (обозначаемые далее  $C$  и  $C_0$ ) диагонального элемента, соответствующего сигнальному проводнику, и вычислялись значения  $\tau$  и  $Z$  ( $v_0$  – скорость света в вакууме) как  $\tau = (C/C_0)^{0,5}/v_0$ ,  $Z = 1/(v_0(C \cdot C_0)^{0,5})$ .

Выполнены вычисления при изменении расстояния ( $2s+w$ ) между боковыми проводниками, расположенными в воздухе, для  $h_1 = 0,1-0,9$  мм (рис. 2).

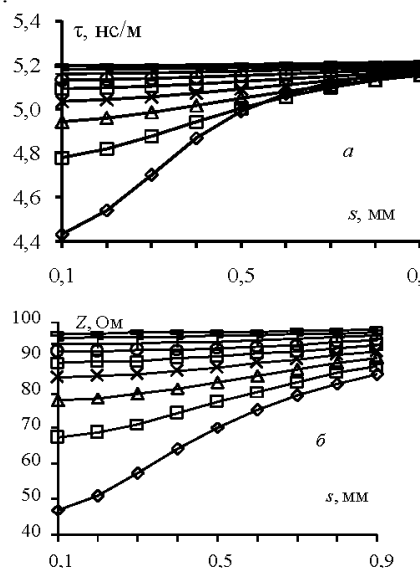


Рис. 2. Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $s$  при  $h_1 = 0,1$  ( $\diamond$ );  $0,2$  ( $\square$ );  $0,3$  ( $\Delta$ );  $0,4$  ( $\times$ );  $0,5$  ( $\square$ );  $0,6$  ( $\circ$ );  $0,7$  ( $+$ );  $0,8$  ( $-$ );  $0,9$  ( $-$ ) мм

Видно, что при увеличении  $s$  значения  $\tau$  и  $Z$  плавно увеличиваются. При малых значениях  $h1$  и  $s$  изменения  $\tau$  и  $Z$  более выражены, и рост  $h1$  приводит к увеличению значений  $\tau$  и  $Z$ . Приближение боковых проводников к границе раздела воздух–подложка оказывает особое влияние на характеристики  $\tau$ : при малых значениях  $h1$  характеристики пересекаются. Поэтому выполнено аналогичное вычисление для  $h1 = 0,1–0,2$  мм с шагом  $0,02$  мм (рис. 3). Видно аналогичное поведение зависимостей при малых  $s$ . Однако при  $s = 0,5–0,9$  мм выявляется минимальная (близкая к нулевой) чувствительность  $\tau$  к изменению  $h1$ , что можно использовать для получения стабильной задержки.

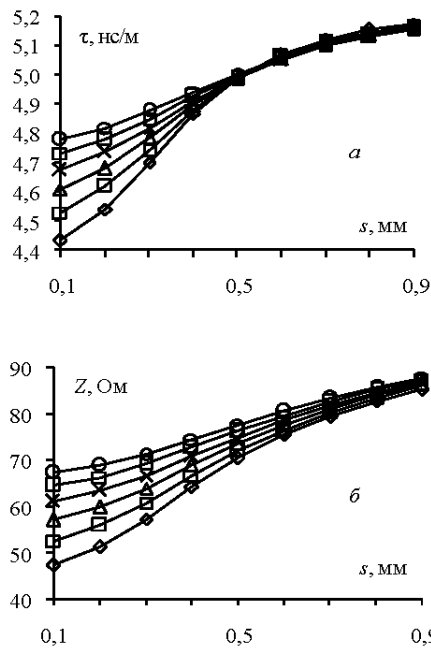


Рис. 3. Зависимости  $\tau$  (а) и  $Z$  (б) от  $s$  при  $h1 = 0,1$  ( $\diamond$ );  $0,12$  ( $\square$ );  $0,14$  ( $\Delta$ );  $0,16$  ( $\times$ );  $0,18$  ( $\square$ );  $0,2$  ( $\circ$ ) мм

В заключение отметим, что данные результаты получены для конкретных значений параметров ли-

нии. Однако легко получить аналогичные зависимости при других значениях параметров. Результаты работы могут быть использованы для проектирования линий передачи со стабильными характеристиками.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

#### Литература

1. Бахарев С.И., Вольман В.И. Справочник по расчету и конструированию СВЧ-полосковых устройств. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
2. Газизов Т.Р. Характеристики подвешенной и обращенной полосковых линий // Известия вузов. Физика. – 1995. – Т. 39, №2. – С. 126–128.
3. Сагиева И.Е. Моделирование характеристик микрополосковой линии, покрытой заземленным проводником // Научная сессия ТУСУР–2017: Матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа, Томск, 10–12 мая 2017 г.: в 8 ч. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 3. – С. 77–79.
4. Сагиева И.Е. Исследование характеристик экранированной микрополосковой линии // Изв. вузов. Физика (в печати).
5. Сагиева И.Е. Моделирование характеристик микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками, углубленными в подложку // Сборник тезисов научно-технической конференции молодых специалистов АО «ИСС», Россия, Железнодорожск, 23–25 августа 2017. – С. 89–91.
6. Riaziat M., Majidi-Ahy R., Feng I-J. Propagation Modes and Dispersion Characteristics of Coplanar Waveguides // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – March 1990. – Vol. 38, No 3. – PP. 241–251.
7. Gazizov T.R., Salov V.K., Kuksenko S.P. Stable Delay of Microstrip Line with Side Grounded Conductors // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2017. – Article ID 1965739. – 5 p.
8. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.

УДК 621.3.038

А.А. Романов, А.А. Собко, М.Е. Комнатнов

## Разработка платы ввода и обработки команд управления климатической экранированной камерой

Рассматриваются разработка устройства ввода и обработки команд управления климатической экранированной камеры; применение матрицы кнопок; использование четырехслойной печатной платы. Приведены структурная схема и печатная плата блока ввода и обработки команд управления.

**Ключевые слова:** климатическая экранированная камера, пульт управления, матрица кнопок, светодиодная индикация, печатная плата.

В научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» ТУСУРа разрабатывается климатическая экранированная ТЕМ-камера

(КЭК) для совместных климатических и электромагнитных испытаний радиоэлектронных средств [1]. Актуальность данной разработки показана в работах [2–4]. Контроль процесса проведения исследова-