

4. Chen W. Snubberless bidirectional DC-DC converter with new CLLC resonant tank featuring minimized switching loss / W. Chen, P. Rong, Z. Y. Lu // IEEE Trans. Ind. Elec-tron. – 2010. – vol. 57, no. 9. – P. 3075–3086.
5. Minimum current operation of bidirectional dual-bridge series resonant DC/DC converters / L. Corradini, D. Seltzer, D. Bloomquist, R. Zane, D. Maksimovic, B. Jacobson //– IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – vol. 27, no. 7. – P. 3266-3276.
6. Doncker De R.W.A.A. A threephase soft-switched high-power-density DC/DC converter for highpower applica-tions / R.W.A.A. De Doncker, D.M. Divan, M.H. Kheraluwala // IEEE Transaction on Industry Applica-tions. – 1991. – vol.27, no. 1. – P. 63–73.
7. Jang Y. A New PWM ZVS Full-Bridge Converter / Y. Jang, M. M. Jovanovic // IEEE Trans. Power Electron. – 2007. – vol.22, n 5. – P. 987–994.
8. Hillers A. Design of a Highly Efficient Bidirectional Isolated LLC. Resonant Converter. / A. Hillers, D. Christen, J. Biela // Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC),15th International. – 2012.
9. Nguyen D.D. Dual-active-bridge series resonant con-ver-ter: A new control strategy using phase-shifting combined frequency modulation. / D.D. Nguyen, D.T. Nguyen, G. Fujtta // IEEE Conference Publications. – 2015. – n 10. – P 1215–1222.
10. Burdio J. Comparison study of fixed-frequency con-trol strategies for ZVS dc/dc series resonant converters. / J. Burdio, F. Canales, P. Barbosa, F. Lee. // Power Electronics Specialists Conference (PESC). – 2001. – vol. 1. – P. 427–432.
11. Yachiangkam.S. Comparison of control strategies for series resonant full-bridge inverter for induction cookers. /S. Yachiangkam, A. Sangswang, S. Naetiladdanon // Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 13th International Con-ference. – 2016.
12. Oggier, G.G. Switching Control Strategy to Minimize Dual Active Bridge Converter Losses. / G.G Oggier, G.O Gar-cia, A.R. Oliva // IEEE Trans. Power Electron, 2009. – vol.24, no.7. – P. 1826–1838.
13. Watson R. Analysis, design and experimental results of a 1-kW FB-ZVS-PWM converter employing magamp sec-ondary side control / R. Watson, F.C. Lee // IEEE Trans. Ind. Electron, 1998. – vol. 45, no. 5. – P. 806–814.

УДК 621.372.8.01

И.Е. Сагиева

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

г. Томск

e-mail: indira_sagieva@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ С БОКОВЫМИ ЗАЗЕМЛЕННЫМИ ПРОВОДНИКАМИ, УГЛУБЛЕННЫМИ В ПОДЛОЖКУ

Электрическое проектирование бортовой радиоэлектронной аппаратуры является важным этапом создания космических аппаратов. Высокие характеристики печатных плат (ПП) важны для высокоэффективных миниатюрных узлов, обладающих надежностью, быстродействием, стабильностью электрофизических параметров, электромагнитной совместимостью. Для этого необходимы новые конструкторско-технологические решения, в частности, линии передачи со стабильными характеристиками погонной задержки и волнового сопротивления. Поэтому актуальны исследования этих характеристик.

Одной из основных линий, реализуемых на ПП, является микрополосковая линия передачи (МПЛ) [1]. Предметом повышенного интереса становятся различные модификации МПЛ, например, подвешенная и обращенная полосковые линии, позволяющие получить нулевую чувствительность

погонной задержки и волнового сопротивления к изменению толщины диэлектрических слоев [2]. Подобная закономерность обнаружена в МПЛ, покрытой заземленным проводником [3], и экранированной МПЛ [4]. Известен детальный анализ мод и дисперсии в такой линии и ее разновидностях [5]. В многослойных печатных платах используются разновидности МПЛ, например, микрополосковая линия с полигонами на различных слоях, позволяющая получить стабильное значение погонной задержки [6]. 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 (τ) и волнового сопротивления (Z) МПЛ от расстояния между боковыми заземленными проводниками при их углублении в подложку.

Для достижения указанной цели исследована структура МПЛ с боковыми проводниками, углубленными в подложку (рисунок 1). Выбраны 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 $w1=1$ мм, толщина диэлектрической подложки $h=1$ мм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r = 4,5$.

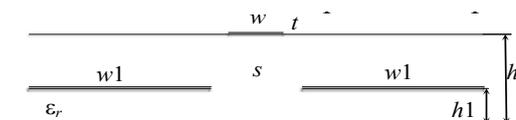


Рисунок 1 – Поперечное сечение МПЛ с боковыми заземленными проводниками, углубленными в подложку

В системе TALGAT [7] построена геометрическая модель поперечного сечения линии и методом моментов вычислены матрицы (порядка 3*3) погонных коэффициентов электростатической индукции, с учетом диэлектрика и без него.

Из матриц брались значения (обозначаемые далее C и C_0) диагонального элемента, соответствующего сигнальному проводнику, и вычислялись значения τ и Z (v_0 – скорость света в вакууме):

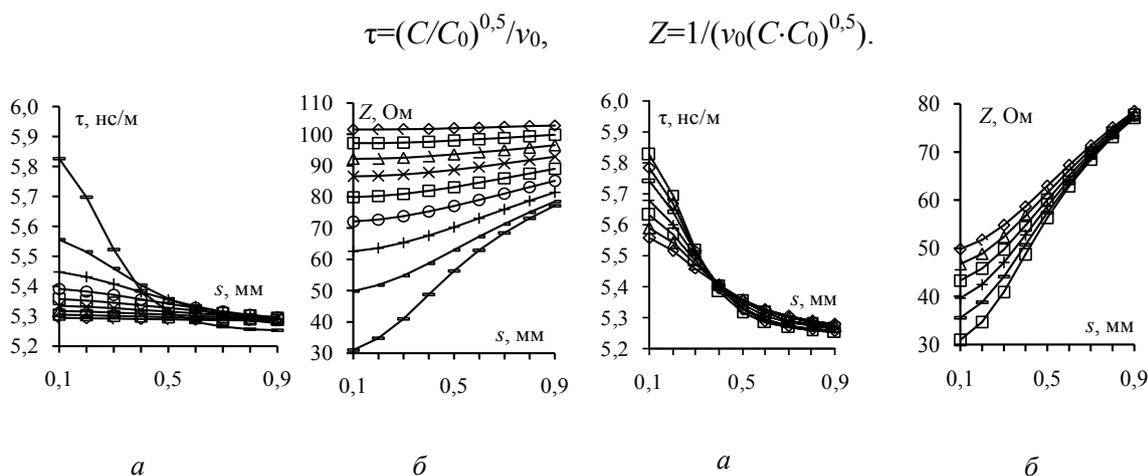


Рисунок 2 – Зависимости τ (*а*) и Z (*б*) от s при $h1=0,1$ (\diamond); $0,2$ (\square); $0,3$ (Δ); $0,4$ (\times); $0,5$ (\square); $0,6$ (\circ); $0,7$ ($+$); $0,8$ ($-$); $0,9$ ($-$) мм

Рисунок 3 – Зависимости τ (*а*) и Z (*б*) от s при $h1=0,8$ (\diamond); $0,82$ (Δ); $0,84$ (\square); $0,86$ ($+$); $0,88$ ($-$); $0,9$ (\square) мм

Выполнены вычисления при изменении расстояния s между боковыми проводниками, углубленными в подложку для $h1=0,1-0,9$ мм (рисунок 2). По рисунку 2 видно, что при увеличении s значение τ плавно уменьшается, а Z – увеличивается. При малом значении $h1$ изменения τ и Z малы, однако рост $h1$ приводит к увеличению значения τ и уменьшению значения Z , причем при малых значениях s изменения τ и Z более выражены. Приближение боковых проводников к границе раздела воздух-подложка оказывает особое влияние на исследуемые характеристики. Поэтому выполнено моделирование с более мелким шагом у границы воздух-подложка: при $h1=0,8; 0,82; 0,84; 0,86; 0,88; 0,9$ мм (рисунок 3). Анализ результатов рисунка 3 показывает аналогичное поведение зависимостей, однако выявляет его специфику. Она выражена в усилении влияния при приближении боковых проводников к границе раздела воздух-подложка при малых значениях s . Так, при $s=0,1$ мм значение τ увеличивается от 5,5 до 5,8 нс/м. Но возможна и нулевая чувствительность τ к изменению $h1$, что можно использовать для получения стабильной задержки.

В заключение отметим, что данные результаты получены для конкретных значений параметров линии, но могут быть получены для любых других параметров. Аналогично исследованы структуры МПЛ с боковыми заземленными проводниками, примыкающими к границе воздух-подложка снизу и сверху. Результаты могут быть приведены в расширенной версии работы.

Библиографический список

1. Бахарев С.И., Вольман В.И. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. М.: Радио и связь, 1982. 328с.
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: Материалы Межд. научно – техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа, Томск, 10–12 мая 2017 г.: в 8 частях. – Томск: В-Спектр, 2017 – Ч. 3. С. 77–79.
4. Сагиева И. Исследование характеристик экранированной микрополосковой линии. Актуальные проблемы радиофизики – 2017: Материалы Межд. научно – практ. конф., г. Томск. 18–22 сент. 2017 г. (в печати).
5. M. Riaziat, R. Majidi-Ahy, I-J. Feng. Propagation Modes and Dispersion Characteristics of Coplanar Waveguides. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 38, no 3. March 1990, pp. 241–251.
6. T.R. Gazizov, V.K. Salov, and S.P. Kuksenko, «Stable Delay of Microstrip Line with Side Grounded Conductors,» Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 2017, Article ID 1965739, 5 pages, 2017. Doi:10.1155/2017/1965739.
7. 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.