

фициент передачи $|S_{21}|$ практически совпадает во всём диапазоне частот. Таким образом, на рассмотренном примере выявлено, что заполнение ПО диэлектриком практически не влияет на S -параметры. Подход может применяться, когда необходимо сделать ПО в высокочастотной цепи для передачи сигнала на слой в КП другого ЭК. Следующим шагом является широкое многовариантное моделирование для доказательства выявленных в данной работе закономерностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология Via-in-Pad [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://saifontech.ru/articles/tpost/bhcd4e23m1-tehnologiya-via-in-pad>, свободный (дата обращения: 17.02.2026).
2. Заполнение переходных отверстий эпоксидным компаундом с последующей металлизацией [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rezonit.ru/directory/v-pomoshch-konstruktoru/spetsialnye-vozmozhnosti/zapolnenie-perekhodnykh-otverstiy-epoksidnym-kompaundom-s-posleduyushchey-metallizatsiey>, свободный (дата обращения: 20.02.2026).
3. Согласование импедансов: переходные процессы и переходные отверстия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/amp/publications/653173>, свободный (дата обращения: 01.03.2026).
4. Ghosh A. Interference Effects of Via Interconnect in Three Layer Printed Circuit Board / A. Ghosh, S.K. Das, A. Das // Aces Journal. – 2018. – Vol. 33, No. 5. – P. 1040 –1047.

УДК 621.391.825

СВЯЗАННАЯ ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ В ВИДЕ МЕАНДРА С Т-ВЫРЕЗАМИ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМЕХ

М.С. Мурманский, аспирант

*Научный руководитель Е.С. Жечев, доцент каф. СВЧуКР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. СВЧуКР, mihailmurmanskii@gmail.com*

Рассмотрена топология связанной линии передачи в виде меандра, модифицированного T -вырезами, для уменьшения перекрестных помех. По результатам моделирования показано, что применение T -вырезов позволяет снизить уровень FEXT и NEXT на 60 и 15 мВ соответственно.

Ключевые слова: микрополосковые линии передачи, перекрестная помеха, T -вырез.

Уменьшение габаритов устройств, переход с DDR4 на DDR5, а также создание новых систем PCIe предъявляют новые требования к обеспечению электромагнитной совместимости [1]. Микрополосковые линии передачи (МПЛ) на плате являются основным способом пере-

дачи сигнала между двумя микросхемами. В них могут возникать перекрестные помехи из-за электромагнитной связи между соседними проводниками. Их влияние на полезный сигнал приводит к искажениям.

Перекрестные помехи условно разделяют на дальнюю (FEXT) и ближнюю (NEXT). Они ухудшают качество передаваемого сигнала из-за снижения высоты и ширины глазковой диаграммы и увеличения фазовых и амплитудных отклонений [2]. Существует ряд способов подавления перекрёстных помех, например, пространственный разнос проводников на расстояние $3w$ или введение заземленного проводника между активным и пассивным [3, 4]. Однако эти способы повышают габариты устройств и практически не применимы на платах с плотной трассировкой. Поэтому исследование новых конструктивных решений по-прежнему актуально. Цель работы – исследовать одно из таких решений: связанную линию передачи в виде меандра с Т-вырезами для подавления перекрестных помех.

На рис. 1, *а* представлено поперечное сечение исследуемой линии. На рис. 1, *б* представлен вид сверху связанной МПЛ в виде меандра с Т-вырезами. В качестве основы использован материал марки FR-4 ($\epsilon_r = 4,3$, $\tan\delta = 0,025$) с толщиной основы $h = 206$ мкм (толщина фольги $t = 18$ мкм). Ширина проводников и расстояние между проводниками $w = 400$ мкм и $s = 200$ мкм соответственно, а общая длина линии $l = 40$ мм.

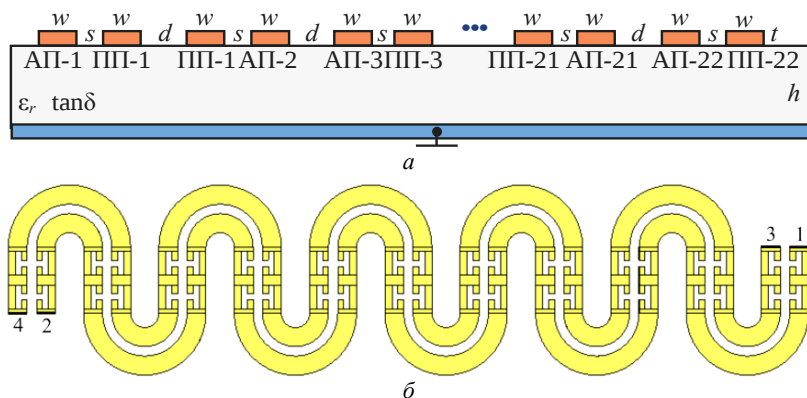


Рис. 1. Поперечное сечение (*а*) и вид сверху (*б*) связанной МПЛ в виде меандра с Т-вырезами

На рис. 2 показаны частотные зависимости FEXT (*а*) и NEXT (*б*) при наличии и отсутствии Т-вырезов в области связи линии.

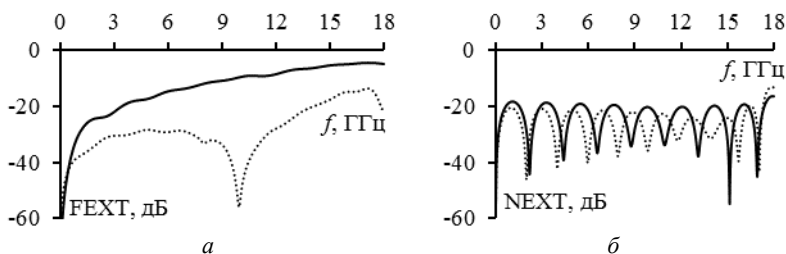


Рис. 2. Частотная зависимость FEXT (а) и NEXT (б) связанной МПЛ в виде меандра с T -вырезами (···) и без них (—)

Из рис. 2 видно, что добавление T -вырезов позволяет расширить диапазон подавления FEXT с пиковым подавлением до минус 55 дБ, а также снизить уровень NEXT на 3 дБ. Затем выполнен анализ временного отклика FEXT и NEXT линии без T -вырезов и с ними. Для этого использовался трапецидальный сигнал с временем спада и нарастания 25 пс и плоской вершины 50 пс. На рис. 3 показаны временные отклики для FEXT (а) и NEXT (а). Из рис. 3, а видно, что при использовании T -вырезов амплитуда FEXT уменьшилась с 80 до 20 мВ, а из рис. 3, б видно, что амплитуда NEXT уменьшилась с 40 до 25 мВ. Таким образом, применение T -вырезов в связанной МПЛ в виде меандра позволяет существенно снизить уровень перекрестных помех на 60 и 15 мВ для FEXT и NEXT соответственно.

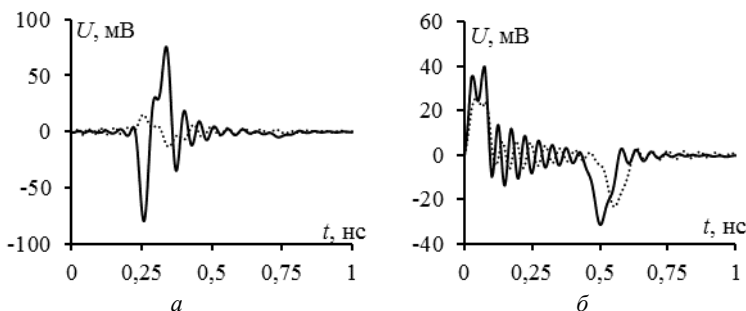


Рис. 3. Временные отклики FEXT (а) и NEXT (б) для связанной МПЛ в виде меандра с T -вырезами (···) и без них (—)

Исследование выполнено в рамках проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang Y. High Signal Integrity Interconnects Embedded With Metasurface for Far-End Crosstalk Reduction and High-Speed Data Transfer / Y. Zhang,

G. Wang // IEEE Transactions on Signal and Power Integrity. – 2024. – Vol. 3, No. 3. – P. 212–218.

2. Lim J. A novel method using a rectangular groove to reduce far-end crosstalk in microstrip lines covered with a dielectric layer / J. Lim, S. Lee, Y. Jeong, J. Lee // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 93643–93652.

3. Lee K. A Serpentine Guard Trace to Reduce the Far-End Crosstalk Voltage and the Crosstalk Induced Timing Jitter of Parallel Microstrip Lines / K. Lee, H.B. Lee, H.K. Jung, J.Y. Sim, H.J. Park // IEEE Transactions on Advanced Packaging. – 2008. – Vol. 31, No. 4. – P. 809–817.

4. Mbairi F.D. High-Frequency Transmission Lines Crosstalk Reduction Using Spacing Rules / F.D. Mbairi, W.P. Siebert, H. Hesselbom // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2008. – Vol. 31, No. 3. – P. 601–610.

УДК 53.043; 538.956

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

М.А. Савкова, студентка

*Научный руководитель О.А. Доценко, доцент каф. радиоэлектроники
НИ ТГУ, к.ф.-м.н.*

г. Томск, НИ ТГУ, каф. радиоэлектроники, savkova.marsha@gmail.com

Представлены результаты экспериментального исследования влияния продолжительности ультразвуковой обработки на электрофизические свойства полимерных композитов на основе лака UNICA SUPER с 0,25 мас.% многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ). Установлено, что время обработки определяет морфологию и диэлектрические свойства композитов. Обработка в течение 3–4 мин способствует разрушению агломератов МУНТ и формированию проводящей сетки, что сопровождается ростом диэлектрической проницаемости до 8,5 отн. ед. Микроскопический анализ подтвердил уменьшение размеров агломератов.

Ключевые слова: многослойные углеродные нанотрубки, ультразвуковая обработка, полимерный композит, диэлектрическая проницаемость, электропроводность, агломерация, диспергирование.

Создание полимерных композиционных материалов с заданными электрофизическими свойствами является одним из приоритетных направлений современного материаловедения [1]. Особый интерес представляют композиты, способные эффективно рассеивать статическое электричество или экранировать электромагнитное излучение. Основным подходом к приданию диэлектрическим полимерным мат-