

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.17>

УДК: 621.372.2

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЯЗАННОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

Н.О. Кузьмин, М.С. Мурманский, Е.С. Жечев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 8 августа 2024 г.

Аннотация. Проведена оценка влияния производственных дефектов на характеристики связанной микрополосковой линии. Результаты квазистатического анализа показали, что при изменении времени травления и значений ε_r изменяются значения матриц \mathbf{C} и \mathbf{L} , что в свою очередь оказывает влияние на частотные и временные характеристики линий передачи. Из результатов электродинамического анализа выявлено, что в зависимости от формы проводников изменяется линейность коэффициента передачи. Показано, что при изменении формы проводников связанных линий передачи с увеличением времени травления, резонансы сдвигаются в сторону больших частот. Анализ полученных матриц \mathbf{C} и \mathbf{L} , выявил, что с увеличением времени травления, собственные значения \mathbf{C} и \mathbf{Z} уменьшаются, а \mathbf{L} – увеличиваются. Это связано с уменьшением площади поперечного сечения проводника, а также изменением значений ε_r материалов. Выявлено, что увеличение времени травления приводит к изменению формы напряжения на дальнем конце активного проводника. Также получено, что 3 форма проводников обладает наилучшими характеристиками с точки зрения помехоподавления. Структура

с прямоугольной формой проводников обладает наименьшими значениями погонной емкости. Это оказывает влияние на характеристики связанной МПЛ.

Ключевые слова: квазистатическое моделирование, относительная диэлектрическая проницаемость, травление, электродинамическое моделирование.

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

Автор для переписки: Кузьмин Никита Олегович kuzjmin.nikita23@gmail.com

Введение

Ввиду постоянного и стремительного развития радиоэлектронных систем (РЭС), их стабильная работа все больше зависит от выполнений требований электромагнитной совместимости [1, 2]. В состав РЭС входят множество электрических цепей, узлов и межсоединений. Основной сборочной единицей является печатная плата (ПП), широко применяемая из-за возможности гибкого конструирования, а также низкой стоимости. Помимо модернизации отдельных блоков и узлов РЭС, входящих в её состав, необходимо находить оптимальные методы их производства. В условиях повышенной плотности монтажа, требований к надежности и помехозащищенности, эффективность изготовленных систем и компонентов напрямую зависит от прогресса радиоконструирования [3-5]. Так, при производстве ПП необходимо учитывать дефекты, возникающие в процессе производства, поскольку их не учёт может привести к негативным последствиям работы РЭС, вплоть до оказания негативного влияния на окружающую среду и людей. Одним из основных производственных дефектов при изготовлении ПП является несоответствие размеров, расположения и проводимости проводящих дорожек. Неправильное расположение и размеры дорожек могут привести к короткому замыканию или разрыву цепи, что негативно скажется на работоспособности устройства. Также важно учитывать дефекты, связанные с качеством материалов, от которых зависят электрические характеристики ПП [6].

Игнорирование производственных дефектов при изготовлении ПП может привести к серьезным последствиям, таким как недостоверная передача данных, перегрев устройства, выход из строя целых узлов и т.д. [7].

Работы по тематике оценки влияния травления проводников на временные характеристики микрополосковых линий передачи уже публиковались [8, 9], однако там лишь проводилась оценка влияния травления проводников прямоугольной формы и формы проводников в виде правильной трапеции. В первой изменяется параметр подтравливания и, соответственно, геометрия проводника, а во второй проводится сравнение результатов моделирования по предложенной прогрессии, а также экспериментальных результатов. Дополнительно к этому, зная, что при производстве ПП заготовки проходят целый комплекс поэтапного изготовления, необходимо учитывать ряд факторов (например, электрофизические параметры подложки ПП), влияющих на качество изготовленного прототипа, и как следствие на устройство, в состав которого оно входит.

Научной новизной является, выявление зависимостей, временных и частотных характеристик, пассивных устройств, основанных на микрополосковых линиях при воздействии нескольких основных производственных факторов. Практической значимостью является учет изменения временных и частотных характеристик пассивных устройств на основе микрополосковых линий.

Таким образом, целью данной работы является оценка влияния травления проводников и изменения диэлектрической проницаемости подложки ПП на временные и частотные характеристики связанной микрополосковой линии.

1. Материалы, подходы и методы

Если материал композитный, например армированный слоистый диэлектрик, значение относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_r) может значительно изменяться в зависимости от долевого содержания каждой компоненты [10]. Однако при производстве ПП с подложкой из материала FR-4 изменение ϵ_r наиболее вероятно из-за самой технологии изготовления. Неверная

ориентация стеклянных волокон вносит влияние в значение диэлектрической проницаемости [11], однако согласно стандарту [12], достигнутое значение $\epsilon_r = 4.5$. Если проводить сравнение с AD1000 (ламинат, армированный стекловолокном, то у FR-4 наблюдается низкая частотная стабильность ϵ_r [12, 13]. Выбор данных материалов основывается, на том, что данные материалы повсеместно используются при проектировании РЭА [14, 15]. На рисунке 1 представлена частотная зависимость отклонения ϵ_r материала AD1000 и FR-4.

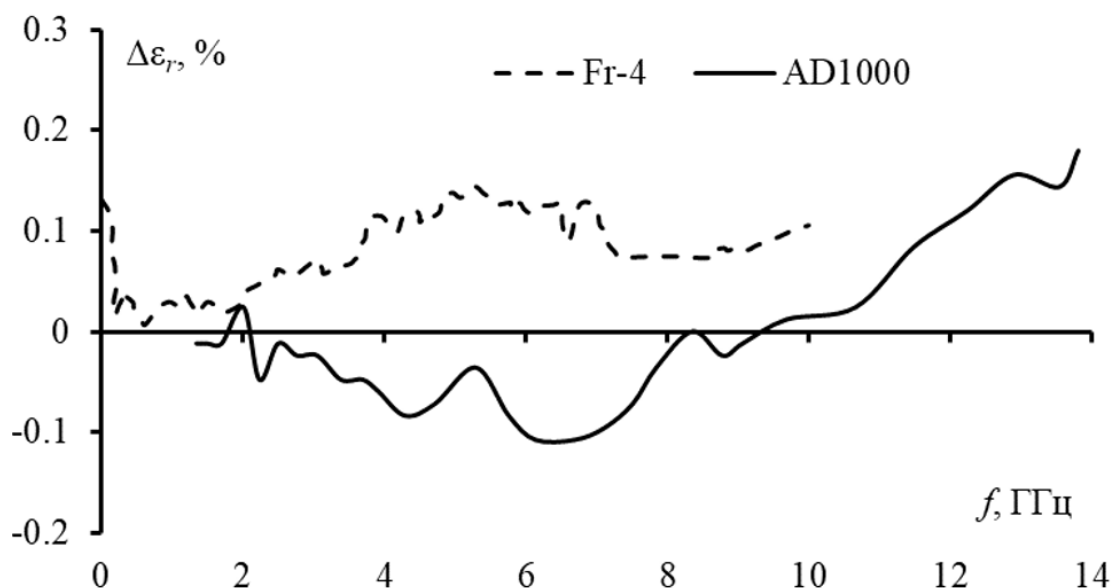


Рис. 1. Частотная зависимость ϵ_r материалов AD1000 и FR-4.

Существует ряд методов изготовления ПП, наиболее распространенным из которых является субтрактивный метод [16, 17]. Упрощенная технология изготовления ПП включает в себя несколько следующих этапов: заготовка ПП покрывается селективной защитой на участках, где необходимо сохранить проводящий рисунок; подготовленная заготовка погружается в травильный раствор и находится в нем до тех пор, пока не стравятся излишки проводящего слоя, незащищенные селективной защитой. Таким образом, при травлении происходит стравливание меди, это неравномерный процесс, при котором проводники могут приобретать различные формы [18, 19], наиболее встречающиеся из которых представлены на рисунке 2.

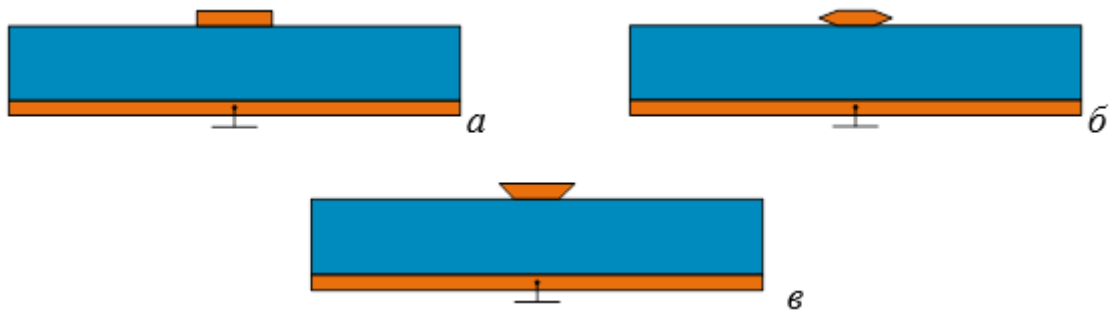


Рис. 2. Поперечные сечения трапецевидной (а), овальной (б) и Т-образной (в) форм проводников.

Форма проводника зависит от нескольких основных факторов: толщина меди, циркуляция травильного раствора, время травления [20]. В данной работе рассматривается влияние времени травления на характеристики линии передачи на примере связанной микрополосковой линии (МПЛ). Данная линия выбрана в следствии простоты реализации и частоты использования таких линий передачи. Поперечное сечение рассматриваемых структур, и её эквивалентная схема включения представлены на рисунке 3.

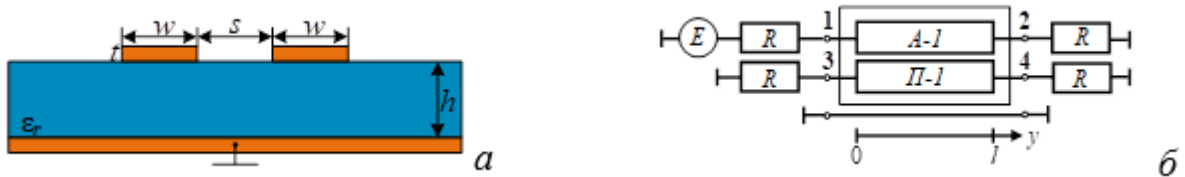


Рис. 3. Поперечное сечение связанной МПЛ (а) и её эквивалентная схема включения (б).

Выполнен анализ характеристик связанной МПЛ, при этом первый проводник являлся сигнальным, второй – нагруженным на резисторы с обоих концов. Параметры поперечного сечения связанной МПЛ: ширина проводника $w = 0.03$ мм, высота проводника $t = 0.005$ мм, расстояние между проводниками $s = 0.33$ мм, высота диэлектрической подложки $h = 0.1$ мм, длина линии $l = 5$ см. Рассмотрены структуры с диэлектрическими подложками из керамики AD1000 и стеклотекстолита FR-4, со значениями $\epsilon_{rAD1000} = 10.2$ и $\epsilon_{rFR-4} = 4.5$. Номинал резисторов в эквивалентной схеме включения составил 50 Ом. Оценка временных откликов выполнена на примере трапецевидального импульса с параметрами: время нарастания, длительности и спада фронта по 50 пс, общей

длительностью воздействия – 150 пс. Такое воздействие выбрано, потому что его спектр лежит в исследуемом частотном диапазоне.

Рассмотрены три случая: два промежуточных времени травления и эталонный случай, у которого проводники имеют прямоугольную форму (далее обозначается, как 1). При травлении рассмотрены структуры с проводниками трапецевидной формы, у которых нижнее основание, находящееся на диэлектрической подложке, больше верхнего основания (далее обозначается, как 2) и обратный этому случаю (далее обозначается, как 3). Все исследуемые структуры представлены на рисунке 4.

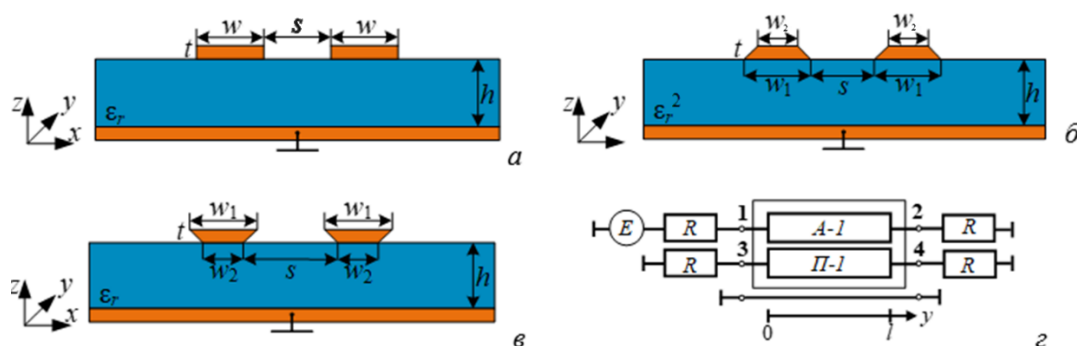


Рис. 4. Поперечные сечения связанных МПЛ с формами проводников 1 (а), 2 (б), 3 (в) и их эквивалентная схема включения (г).

Предполагалось, что каждому случаю соответствуют индивидуальные значения геометрических параметров с постоянным значением ϵ_r диэлектрических подложек 4.5 и 10.2 для FR-4 и AD1000 соответственно. Далее для частного случая при времени травления $t = 110$ с, изменялись значения ϵ_r диэлектриков FR-4 и AD1000. Брались значения ϵ_r , равные 3.6, 5.4 и 9.85, 10.55 (в соответствии с их техническими документациями) для FR-4 и AD1000 соответственно. Прогрессия травления и значения погрешности ϵ_r диэлектриков, используемых в работе, представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1. Геометрические значения проводников при различном времени травления для рассматриваемых структур.

Время травления t , с	Форма проводника и их геометрические параметры				
	1	2		3	
	w , МКМ	w_1 , МКМ	w_2 , МКМ	w_1 , МКМ	w_1 , МКМ
110	30	40	30	40	30
140	30	30	15	30	15

Таблица 2. Значения ε_r при различном времени травления для рассматриваемых структур.

Время травления t , с	Материал и их ε_r	
	FR-4	AD1000
110	3.6	9.85
140	5.4	10.55
Эталон	4.5	10.2

2. Результаты квазистатического моделирования

В данном разделе приведены результаты исследования связанной МПЛ во временной области. Моделирование проведено в системе квазистатического анализа TALGAT [21]. Она позволяет получить точные рассчитанные значения коэффициентов матриц электростатической (\mathbf{C}) и электромагнитной индукции (\mathbf{L}) с минимальными ресурсными затратами, поскольку предполагается, что в исследуемой структуре распространяется только квази-поперечная Т-волна. Проведено моделирование каждой структуры при различном времени травления t с эталонными значениями ε_r . Подавалось воздействие в форме трапециевидного импульса с амплитудой ЭДС 1 В. Сегментация задавалась согласно $t/5$. Получены временные отклики на помеховый импульс и погонные значения коэффициентов матриц \mathbf{L} , \mathbf{C} , \mathbf{Z} (таблицах 3, 4), где собственные значения матриц выделены жирным шрифтом.

Таблица 3. Значения коэффициентов матриц \mathbf{L} , \mathbf{C} , \mathbf{Z} для рассматриваемых структур с диэлектриком FR-4 при различных t .

Структура	t , с	\mathbf{C} , пФ/м		\mathbf{L} , мкГн/м		\mathbf{Z} , Ом/м	
2	110	69.298	-28.456	0.564	0.267	98.860	43.765
		-28.456	69.298	0.267	0.564	43.765	98.860
2	140	58.844	-20.806	0.627	0.259	110.321	42.326
		-20.806	58.844	0.259	0.627	42.326	110.321
3	110	83.869	-26.668	0.565	0.269	88.641	34.268
		-40.477	89.867	0.269	0.565	41.024	85.706
3	140	79.624	-20.584	0.630	0.262	93.438	31.067
		-30.720	83.090	0.262	0.630	36.700	91.511
1	-	59.298	-22.558	0.602	0.262	108.915	44.478
		-22.558	59.298	0.262	0.602	44.478	108.915

Таблица 4. Значения коэффициентов матриц L , C , Z для рассматриваемых структур с диэлектриком AD1000 при различных t .

Структура	t , с	C , пФ/м		L , мкГн/м		Z , Ом/м	
		2	110	140.330	-55.338	0.564	0.267
		-55.338	140.330	0.267	0.564	29.963	68.905
2	140	119.519	-40.488	0.627	0.259	76.936	28.963
		-40.488	119.519	0.259	0.627	28.963	76.936
3	110	188.512	-50.603	0.565	0.269	58.303	21.134
		-91.128	204.609	0.269	0.565	26.840	56.036
3	140	193.230	-40.958	0.630	0.262	59.252	18.400
		-71.377	202.440	0.262	0.630	22.780	57.926
1	1	117.868	-43.265	0.602	0.262	76.787	30.860
		-43.265	117.868	0.262	0.602	30.860	76.787

Из таблиц 3 и 4 видно, что с увеличением времени травления значения коэффициентов матриц C и Z уменьшаются, а L – увеличиваются. Изменение рассматриваемых параметров связано с изменением формы проводника. Площадь поперечного сечения проводника уменьшается, что приводит к результату, описанному выше. Видно, что у структуры с диэлектрическим наполнением из FR-4 наблюдается большее изменение рассматриваемых параметров между структурами с трапециевидными и прямоугольными проводниками. Так, для структуры из материала FR-4 значение C_{11} увеличилось в 1.17 раза (между случаем $t = 110$ с при формах проводников 1 и 2). Значения L_{11} и Z_{11} уменьшились в 1.07 и 1.1, соответственно. Для дополнительного анализа формы напряжений использовались N -нормы [22]. Вычисления N -нормы основаны на применении математических операторов ко всей форме сигнала. Краткое описание N -норм представлено в таблице 5. Также в ходе моделирования получены зависимости выходных напряжений для рассматриваемых структур, представленные на рисунке 5.

Таблица 5. Краткое описание N -норм.

№	Формула	Наименование	Обозначение
N_1	$ U(t) _{\max}$	Пиковое (абсолютное) значение	Сбой схемы / электрический пробой / дуговые эффекты
N_2	$\left \frac{\delta U(t)}{\delta t} \right $	Пиковая (абсолютная) производная	Искрение компонента / сбой схемы
N_3	$\left \int_0^t U(t) \right _{\max}$	Пиковый (абсолютный) импульс	Диэлектрический пробой (если R обозначает поле E)
N_4	$\int_0^{\infty} U(t) dt$	Выпрямленный общий импульс	Повреждение оборудования
N_5	$\left\{ \int_0^{\infty} U(t) ^2 dt \right\}^{1/2}$	Квадратный корень интеграла действия	Выгорание компонента

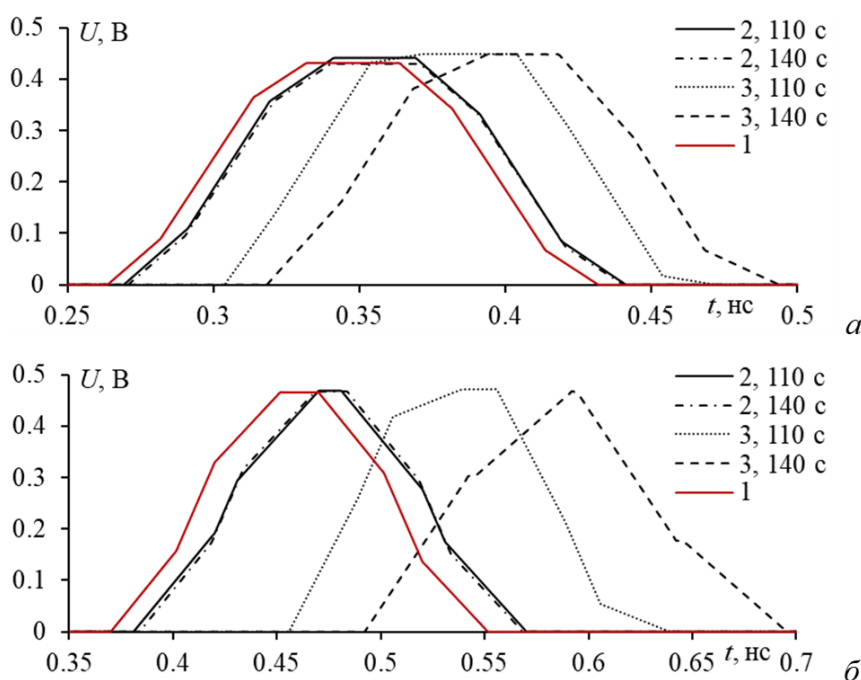


Рис. 5. Зависимости выходных напряжений для структур связанной МПЛ с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при $t = 110$ нс (—); 2 при $t = 140$ нс (— ·); 3 при $t = 110$ нс (···); 3 при $t = 140$ нс (- -) и формы 1 (—) (квазистатический анализ).

Из рисунка 5 видно, что форма проводников 1 характеризуется минимальным временем задержки T , которое составило 0.263 и 0.431 нс, соответственно. Также следует, что 3 форма проводников характеризуется максимальным значением T , которое соответствует 0.318 и 0.495 нс для FR-4 и

AD1000, соответственно. Выявлено, что форма 2 характеризуется средними значениями T , которые составили 0.263 и 0.44 нс. Значение T структуры с проводниками формы 2 находится между значениями T структур с проводниками форм 1 и 3. Также в структурах с материалом AD1000 значение напряжения изменяется незначительно. Однако с материалом FR-4 видно изменение напряжения у структуры с проводниками формы 3. Наибольшая разница амплитуд напряжений на выходе активной линии наблюдается между сигналами структур с проводниками формы 1 и 3 (разница составила 0.044 В). Также видно, что длительности сигналов отличаются. В случае структур с материалом AD1000, сигнал имеет треугольную форму, что связано с потерями, которые больше в таких структурах. Отличие T между структурами с проводниками трапецевидных форм является наибольшим и составляет 0.11 и 0.12 нс, соответственно. В таблице 6 представлены вычисленные N -нормы для рассматриваемых структур с диэлектриком FR-4 при различном t .

Таблица 6. Значения вычисленных N -норм для рассматриваемых структур с диэлектриком FR-4 при различных t .

Структура	t , с	N_1	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
2	110	0.442	9.248	5	5.013	3.952
2	140	0.431	9.014	5	5.01	3.877
3	110	0.397	5.786	5	5	3.569
3	140	0.398	5.485	5	5	3.565
1	-	0.432	9.026	4.999	5.029	3.897

Видно, что изменение формы проводника и времени травления влияет на значения всех N -норм. Минимальное значение N_1 наблюдается при 3 форме проводника и времени травления 110 с. Так же видно, что 3 форма проводника позволяет уменьшить значение N_2 по сравнению с 1 и 2 формой в 1.557 раз. Дополнительно к этому изменение формы и времени травления практически не оказывает влияние на значение N_3 и N_4 . Минимальное значение N_5 составило $3.565 \cdot 10^6$. В таблице 7 представлены вычисленные N -нормы для рассматриваемых структур с диэлектриком AD1000 при различном t .

Таблица 7. Значения вычисленных N -норм для рассматриваемых структур с диэлектриком AD1000 при различных t .

Структура	t , с	N_1	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
2	110	0.386	7.864	5	5.245	3.522
2	140	0.468	9.339	5	5	4.035
3	110	0.285	6.319	5	5.075	3.172
3	140	0.272	5.47	5	5.025	3.181
1	-	0.466	9.301	5	5.001	4.058

Видно, что минимальные значения N_1 и N_2 наблюдаются для структуры с 3 формой проводников и временем травления 140 с. Форма проводников и изменение времени травления не оказывают никакого влияния на значения N_3 . Максимальное значение N_4 наблюдается при 2 форме проводников и времени травления 110 с. Максимальное значение N_5 наблюдается для эталонного случая и составляет $4.058 \cdot 10^6$.

На рисунке 6 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ для связанной МПЛ с диэлектриками из FR-4 и AD1000.

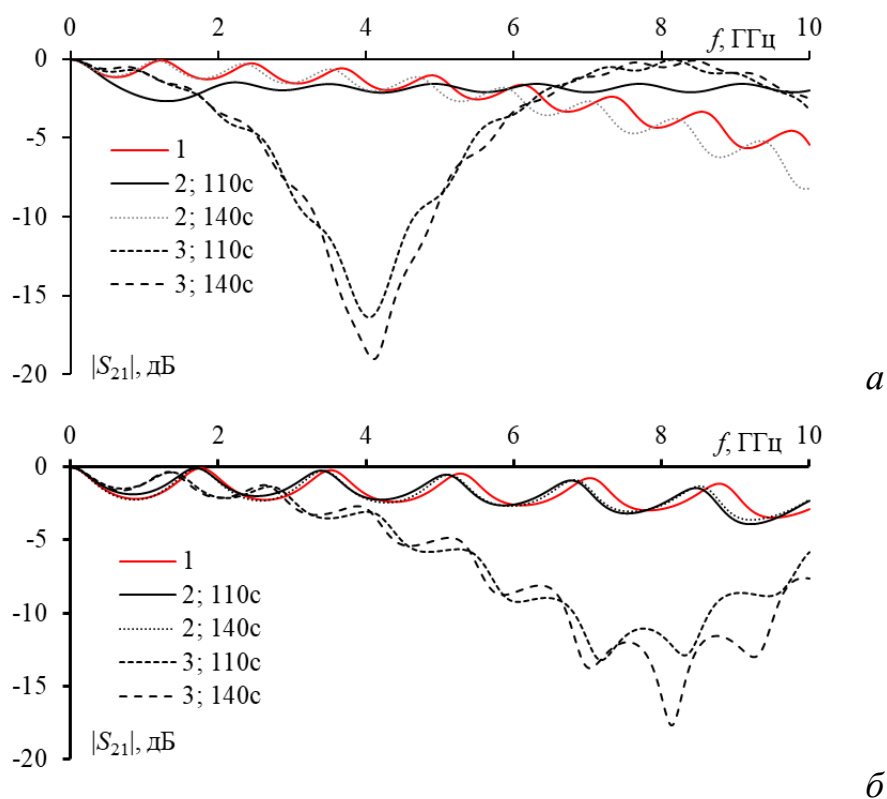


Рис. 6. Частотные зависимости модуля коэффициента передачи с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при $t = 110$ с (—); 2 при $t = 140$ с (- ·); 3 при $t = 110$ с (···); 3 при $t = 140$ с (- -) и формы 1 (—) (квазистатический анализ).

Из рисунка. 6а видно, что формы проводников 3 с различным временем травления обладают наибольшим ослаблением, которое достигает -18 дБ. Такое ослабление вызвано формой проводников. Из рисунка 6б видно, что минимальное ослабление составляет -18 дБ. Таким образом можно сделать вывод, что форма проводников с различным временем травления оказывает значительно влияние на частотные характеристики связанной МПЛ.

После рассматривались структуры с геометрическими значениями, соответствующими $t = 110$ с. Проведено моделирование каждой структуры при различных ϵ_r при $t = 110$ с. Получены временные отклики на помеховый импульс и погонные значения коэффициентов матриц **L**, **C**, **Z** (таблица 8, 9), где собственные значения матриц выделены жирным шрифтом.

Таблица 8. Значения коэффициентов матриц **L**, **C**, **Z** для рассматриваемых структур при $t = 110$ с при различных ϵ_r (FR-4).

Структура	Структура; ϵ_r	C, пФ/м		L, мкГн/м		Z, Ом/м	
2	3.6	58.437	-23.744	0.564	0.267	107.418	47.330
		-23.744	58.437	0.267	0.564	47.330	107.418
2	5.4	81.182	-31.882	0.564	0.267	90.521	39.292
		-31.882	81.182	0.267	0.564	39.292	90.521
3	3.6	68.006	-22.900	0.565	0.269	98.975	39.211
		-32.753	72.416	0.269	0.565	45.897	95.982
3	5.4	100.013	-30.441	0.565	0.269	80.857	30.710
		-48.323	107.604	0.269	0.565	37.369	78.030
1	4.5	59.298	-22.558	0.602	0.262	108.915	44.478
		-22.558	59.298	0.262	0.602	44.478	108.915

Таблица 9. Значения коэффициентов матриц **L**, **C**, **Z** для рассматриваемых структур при $t = 110$ с с различных при различных ϵ_r (AD1000).

Структура	ϵ_r	C, пФ/м		L, мкГн/м		Z, Ом/м	
2	9.85	137.355	-52.026	0.564	0.267	69.128	29.545
		-52.026	137.355	0.267	0.564	29.545	69.128
2	10.55	146.188	-55.197	0.564	0.267	66.969	28.584
		-55.197	146.188	0.267	0.564	28.584	66.969
3	9.85	181.979	-49.132	0.565	0.269	59.366	21.562
		-87.977	197.456	0.269	0.565	27.335	57.066
3	10.55	195.053	-52.075	0.565	0.269	57.294	20.729
		-94.283	211.769	0.269	0.565	26.371	55.059
1	10.2	117.868	-43.265	0.602	0.262	76.787	30.860
		-43.265	117.868	0.262	0.602	30.860	76.787

Видно, что с увеличением времени травления значения коэффициентов матриц \mathbf{C} и \mathbf{Z} уменьшаются, а \mathbf{L} – увеличиваются. Изменение рассматриваемых параметров связано с изменением формы проводника. Площадь поперечного сечения проводника уменьшается, что приводит к результату, описанному выше. Также видно, что у структуры с диэлектрическим заполнением из FR-4 наблюдается большее изменение рассматриваемых параметров между структурами с трапецевидными и прямоугольными проводниками. Так, для структуры с диэлектрической подложкой из FR-4 значение C_{11} увеличилось в 1.17 раза (между случаем $t = 110$ с при формах проводников 1 и 2). Значения L_{11} и Z_{11} уменьшились в 1.07 и 1.1, соответственно. Также в ходе моделирования получены зависимости выходных напряжений для рассматриваемых структур, представленные на рисунке 7.

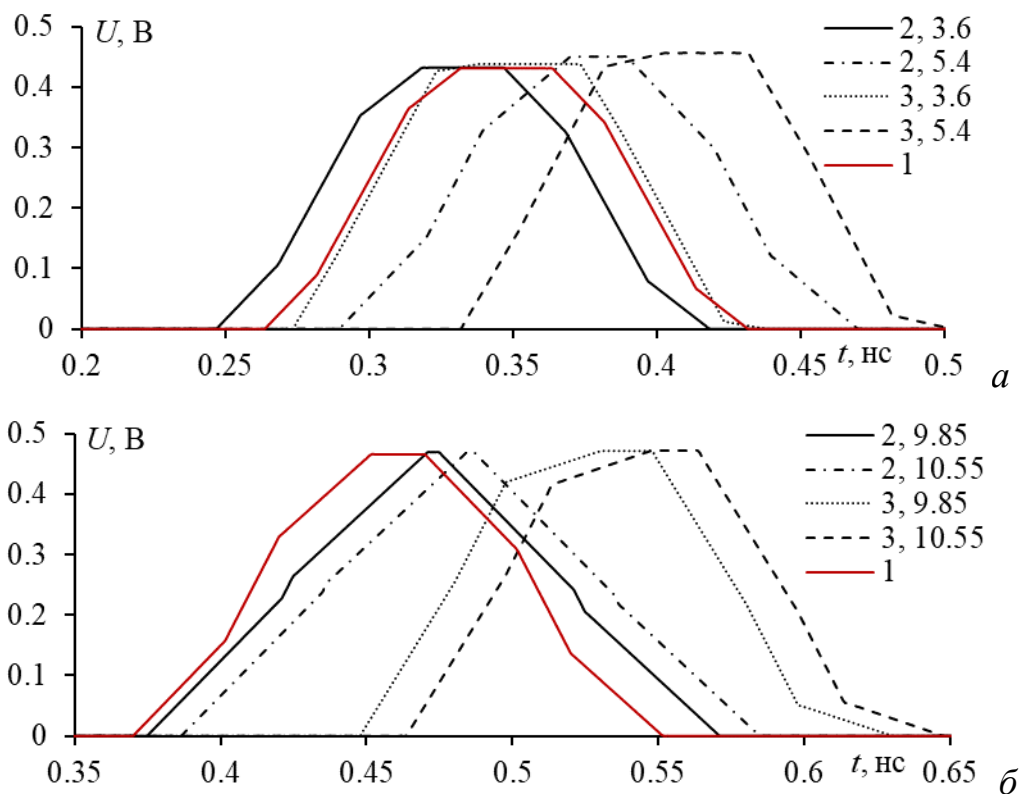


Рис. 7. Зависимости выходных напряжений для структур связанной МПЛ с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при $\epsilon_r = 3.6$, 9.85 (—); 2 при $\epsilon_r = 5.4, 10.55$ (- ·); 3 при $\epsilon_r = 3.6, 9.85$ (···); 3 при $\epsilon_r = 5.4, 10.55$ (- -) и формы 1 (—) (квазистатический анализ).

Видно, что форма проводников 2 характеризуется минимальным временем задержки T для FR-4, которое составило 0.249 нс при $\epsilon_r = 3.6$. Также следует,

что 3 форма проводников характеризуется максимальным значением времени задержки T , которое соответствует 0.332 и 0.464 нс для FR-4 и AD1000, соответственно. Выявлено, что форма 2 характеризуется средними значениями T , которые составили 0.376 и 0.391 нс для AD1000. Также в структурах с материалом AD1000 значение напряжения изменяется незначительно. Однако с материалом FR-4 видно изменение напряжения у структуры с проводниками формы 3. Наибольшая разница амплитуд напряжений на выходе активной линии наблюдается между сигналами структур с проводниками формы 1 и 3 (разница составила 0.016 В). Также видно, что длительности сигналов отличаются. В случае структур с материалом AD1000, сигнал имеет треугольную форму, что связано с потерями, которые больше в таких структурах. В таблице 10 представлены значения вычисленных N -норм для рассматриваемых структур с диэлектриком FR-4 при различном ϵ_r .

Таблица 10. Значения вычисленных N -норм для рассматриваемых структур с диэлектриком FR-4 при различных ϵ_r .

Структура	ϵ_r	N_1	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
2	3.6	0.435	8.871	5	5.023	3.882
2	5.4	0.451	8.995	5	5	3.943
3	3.6	0.435	5.772	5	5	3.66
3	5.4	0.365	5.785	5	5.001	3.473
1	4.5	0.432	9.026	4.999	5.028	3.897

Из таблицы 10 видно, что минимальное значение N_1 наблюдается при 3 форме проводников с ϵ_r равным 5.4. Так же выявлено, что 3 форма проводников обладает наименьшими значениями среди всех N -норм. Дополнительно, к этому видно, что на значения N_3 не оказывает влияния ни форма проводников, ни изменение диэлектрической проницаемости. В таблице 11 представлены вычисленные значения N -норм для рассматриваемых структур с диэлектриком AD1000 при различном t и ϵ_r . Видно, что минимальным значением N_1 обладает 3 форма проводников со значением относительной диэлектрической проницаемости 9.85. Так же видно, что значения N_3 и N_4 практически не изменяются при различных формах проводников и ϵ_r . Максимальное значение N_3

соответствует 3 форме проводников с $\epsilon_r = 10.55$ и временем травления 140 с. На рисунке 8 представлены частотные зависимости модуля коэффициента передачи с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б).

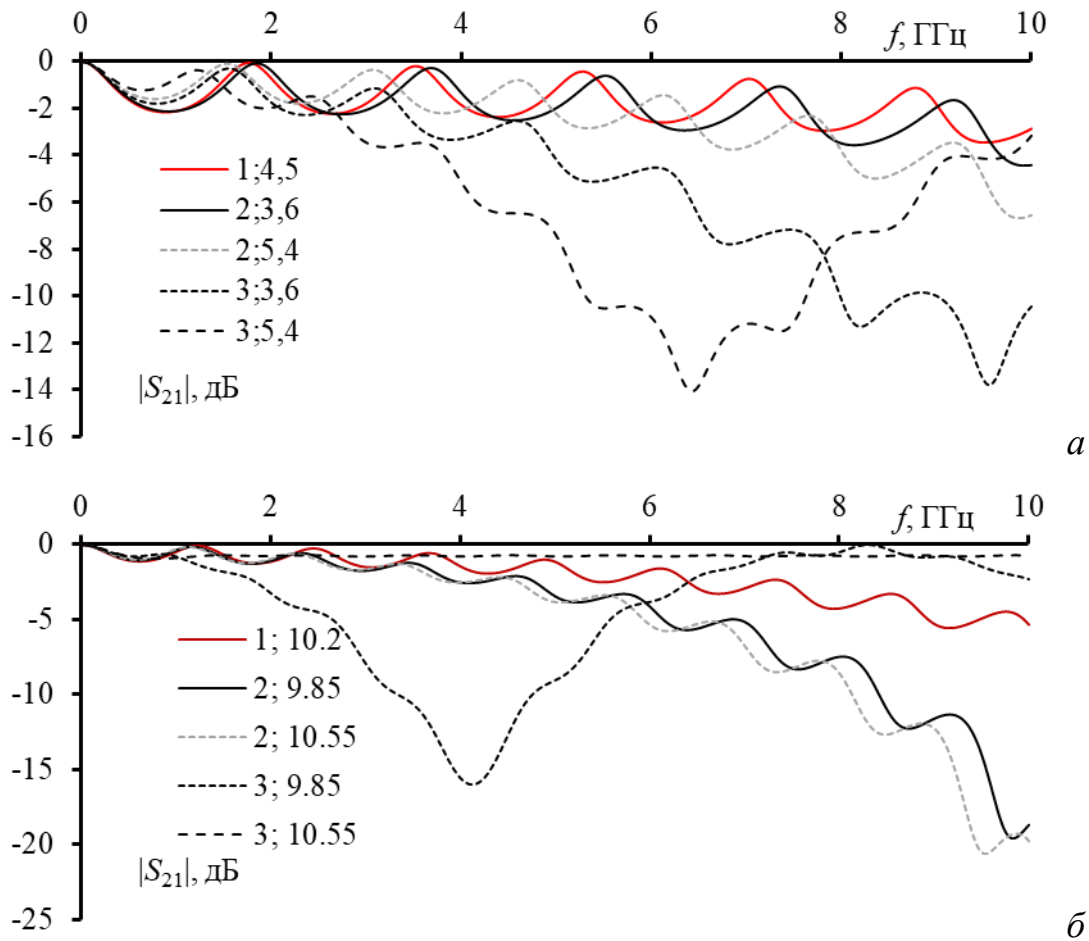


Рис. 8. Частотные зависимости модуля коэффициента передачи с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при $t = 110$ с (—); 2 при $t = 140$ с (- ·); 3 при $t = 110$ с (···); 3 при $t = 140$ с (- -) и формы 1 (—) (квазистатический анализ).

Из рисунка 8а видно, что изменение ϵ_r для 3 формы проводников приводит к уменьшению ослабления с 18 до 14 дБ. Также выявлено, что изменение диэлектрика приводит к увеличению вносимого ослабления. Дополнительно к этому выявлено, что структура с проводниками формы 1 вносит небольшое ослабление на высоких частотах.

3. Результаты электродинамического моделирования

Использование среды электродинамического анализа позволяет провести тщательное исследование изучаемого объекта за счет учета распространения как квази Т-волн, так и высших типов волн. Характеристики структур получены в среде электродинамического моделирования COMSOL Multiphysics. Получены частотные зависимости характеристик рассматриваемых структур (рисунок 9).

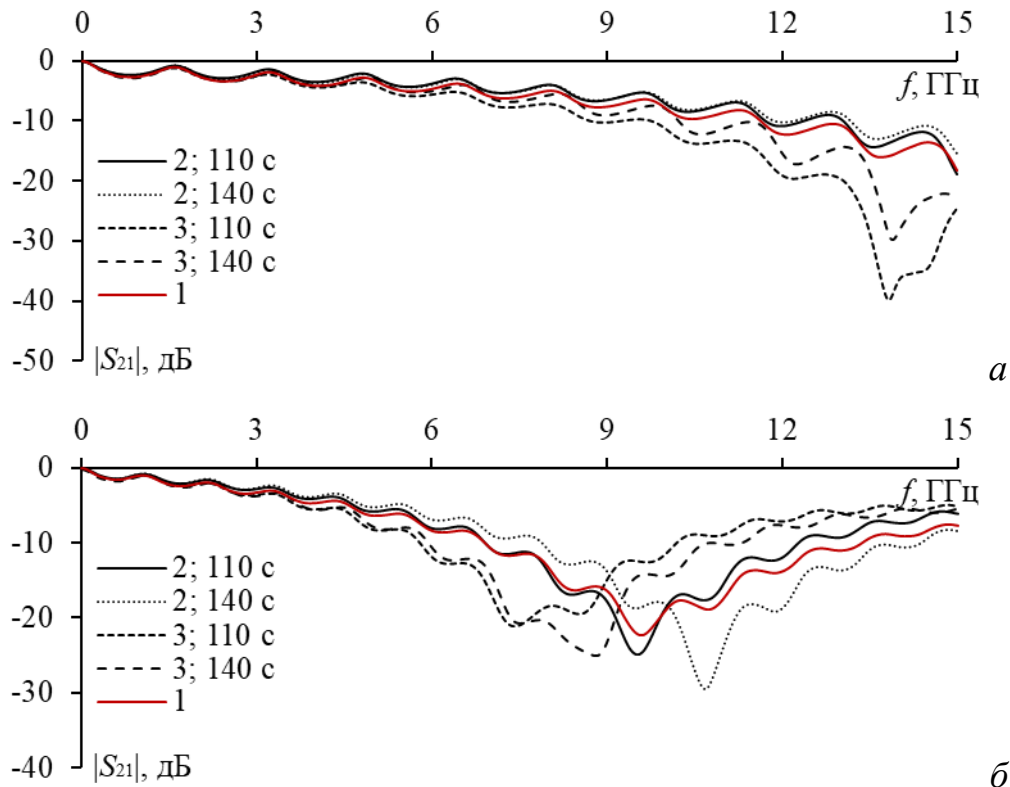


Рис. 9. Частотные зависимости модуля коэффициента передачи с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при $t = 110$ с (—); 2 при $t = 140$ с (· · ·); 3 при $t = 110$ с (---); 3 при $t = 140$ с (- · -) и формы 1 (—) (электродинамический анализ).

При электродинамическом моделировании получено значительно большее ослабление относительно результатов, представленных на рисунке 9. Наблюдаемые расхождения результатов двух видов моделирования связаны с тем, что в квазистатическом моделировании рассматривается структура при распространении квази Т-волны, а в электродинамическом моделировании помимо нее распространяются более высокие типы волн. Из-за разницы форм проводников и значений ϵ_r увеличивается вносимое затухание после 5 ГГц. При увеличении времени травления резонансы сдвигаются в сторону больших

частот. При этом увеличение времени травления приводит к незначительному увеличению вносимого ослабления на высоких частотах (2 и 3 формы проводников).

На рисунке 10 показаны результаты электродинамического моделирования во временной области.

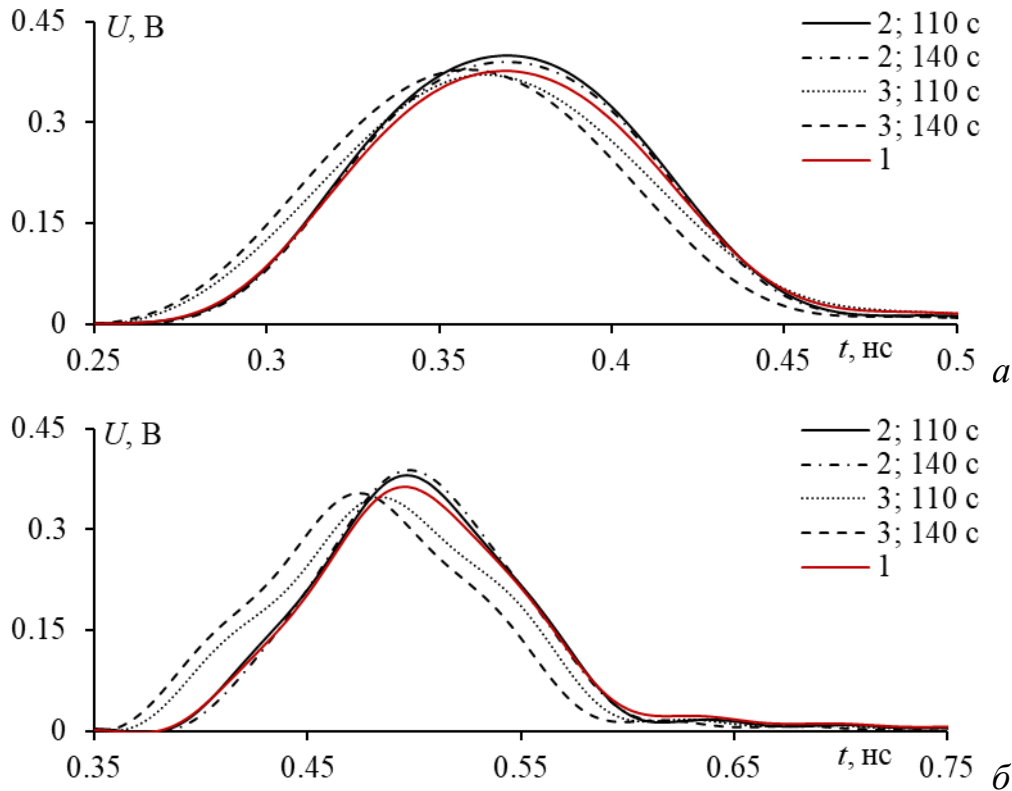


Рис. 10. Зависимости выходных напряжений для структур связанной МПЛ с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при $t = 110$ нс (—); 2 при $t = 140$ нс (---); 3 при $t = 110$ нс (···); 3 при $t = 140$ нс (---) и формы 1 (- -) (электродинамический анализ).

Видно, что формы напряжения на дальнем конце сигнального проводника различаются по времени прихода импульсов. Также наблюдается незначительное отличие в пиковом значении. Дополнительно к этому выявлено, что изменение диэлектрика с FR-4 на AD1000 приводит к сдвигу импульса во временной области. Это вызвано тем, что увеличивается задержка 2 моды, которая распространяется преимущественно в диэлектрике. Из-за этого импульс приходит позже по времени (на 0.139 нс). Также из рисунка 10 видно, что структуры с проводниками 3 формы имеют минимальную задержку.

В таблице 12 представлены вычисленные N -нормы временных откликов в конце активной линии, полученных при помощи электродинамического моделирования для структуры с диэлектриком из материала с FR-4.

Таблица 12. Вычисленные N -нормы временных откликов в конце активной линии, полученных при электродинамическом анализе для структуры с диэлектриком FR-4.

Структура	t, c	N_1	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
1	-	0.378	6.245	4.897	4.905	3.375
2	110	0.401	6.787	4.922	4.939	3.556
2	140	0.39	6.782	4.908	4.91	3.474
3	110	0.371	5.386	4.906	4.927	3.33
3	140	0.379	5.852	4.903	4.907	3.366

Из таблицы 12, видно, что минимальным значением N_1 обладает структура с 3 формой проводников и временем травления 110 с. Так же видно, что все структуры обладают незначительным расхождением в значениях N_4 и N_5 . Однако так же видно, что 3 форма проводников при различном времени травления обладает наименьшими значениями N_2 . В таблице 13 представлены вычисленные N -нормы временных откликов в конце активной линии полученных при помощи электродинамического моделирования для материала с AD1000.

Таблица 13. Вычисленные N -нормы временных откликов в конце активной линии полученных при электродинамическом анализе для структуры с диэлектриком AD1000.

Структура	t, c	N_1	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
1	-	0.364	4.823	4.913	4.935	3.317
2	110	0.382	4.951	4.92	4.953	3.435
2	140	0.388	5.014	4.908	4.95	3.472
3	110	0.348	4.27	4.923	4.947	3.273
3	140	0.355	4.2	4.902	4.921	3.281

Из таблицы 13 видно, что 3 форма проводников обладает также минимальными значениями N -норм. Минимальное значение N_1 составило 0.348, а максимальное – 0.388 для структуры с 2 формой проводников. Таким образом, видно, что формы проводников и время травления влияют на временные характеристики.

После рассматривались структуры с геометрическими значениями, соответствующими $t = 110$ с. Изменялись значения ϵ_r для материалов FR-4, AD1000. Проведено моделирование каждой структуры при различных ϵ_r при $t = 110$ с. Получены частотные зависимости характеристик рассматриваемых структур (рисунок 11).

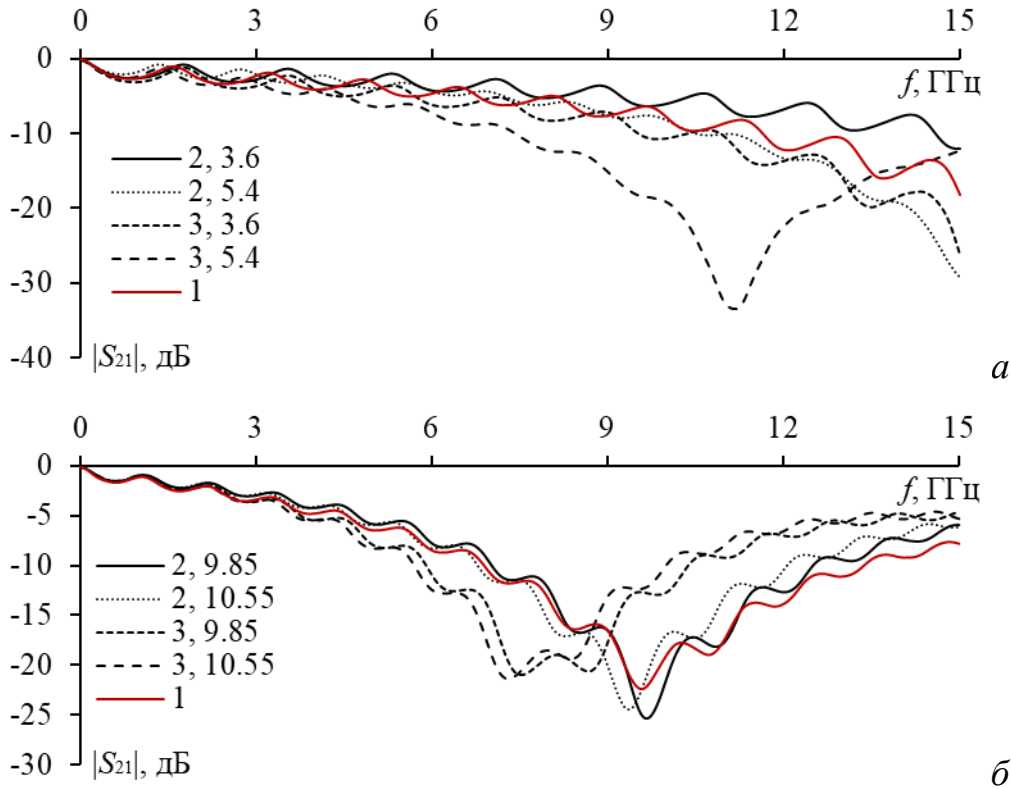


Рис. 11. Частотные зависимости связанной двухпроводной МПЛ с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при $t = 110$ с (—); 2 при $t = 140$ с (···); 3 при $t = 110$ с (- -); 3 при $t = 110$ с (- -) и формы 1 (—) (электродинамический анализ).

Из рисунка 11а видно, что структуры обладают большим ослаблением, чем при квазистатическом моделировании. Так же видно, что максимальное ослабление для материала FR-4 составляет -32 дБ и, что соответствует 3 структуре и $\epsilon_r = 5.4$. Из рисунка 11б видно, что максимальное ослабление для материала AD1000 составляет -27 дБ, что соответствует 2 структуре и $\epsilon_r = 9.85$. Для дополнительного анализа приведем результаты электродинамического моделирования во временной области (рисунок 12) при изменении ϵ_r .

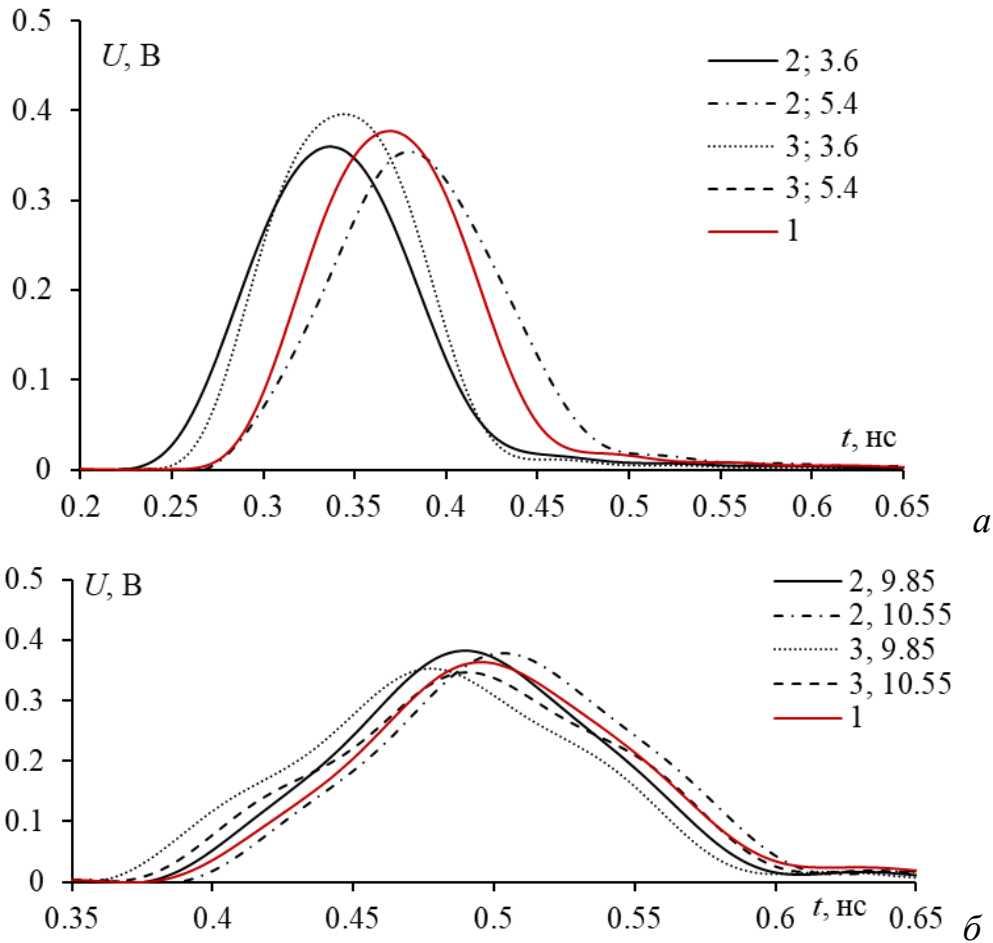


Рис. 12. Зависимости выходных напряжений для структур связанной МПЛ с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при $t = 110$ нс (—); 2 при $t = 140$ нс (- · -); 3 при $t = 110$ нс (···); 3 при $t = 110$ нс (- -) и формы 1 (—) (электродинамический анализ).

Видно, что формы напряжения на дальнем конце сигнального проводника различаются по времени прихода импульсов. Также наблюдается незначительное отличие в пиковом значении. Дополнительно к этому выявлено, что изменение диэлектрика с FR-4 на AD1000 приводит к сдвигу импульса во временной области. Это вызвано тем, что увеличивается задержка 2 моды, которая распространяется преимущественно в диэлектрике. Из-за этого импульс приходит позже по времени (на 0.139 нс). Также из рисунка 12 видно, что структуры с проводниками 3 формы имеют минимальную задержку.

В таблице 14 представлены вычисленные значения N -норм электродинамического моделирования для материала FR-4 при изменении ϵ_r .

Таблица 14. Вычисленные значения N -норм при электродинамическом анализе для структуры с FR-4 при различных ε_r .

Структура	ε_r	N_1	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
1	4.5	0.378	6.245	4.897	4.905	3.375
2	3.6	0.396	7.278	4.925	4.938	3.533
2	5.4	0.354	4.682	4.784	4.827	3.212
3	3.6	0.359	5.651	4.707	4.738	3.224
3	5.4	0.398	6.223	4.928	4.938	3.525

Из таблицы 14 видно, что минимальными значениями N_1 , N_2 , N_5 обладает структура с проводниками в форме 2 при $\varepsilon_r = 5.4$. Однако минимальными значениями N_3 , N_4 обладает уже структура с проводниками в форме 3 со значением $\varepsilon_r = 3.6$. В таблице 15 представлены вычисленные значения электродинамического моделирования для материала AD1000 при изменении ε_r .

Таблица 15. Вычисленные значения N -норм при электродинамическом анализе для структуры с AD1000 при различных ε_r .

Структура	ε_r	N_1	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
1	10.2	0.364	4.823	4.913	4.935	3.317
2	9.85	0.384	4.964	4.918	4.95	3.447
2	10.55	0.379	4.874	4.92	4.97	3.447
3	9.85	0.354	4.324	4.923	4.948	3.447
3	10.55	0.347	4.179	4.924	4.943	3.447

Из таблицы 15 видно, что минимальным значением N_1 , N_2 обладает структура с проводниками в форме 3 со значением $\varepsilon_r = 9.85$. Однако минимальными значениями N_3 , N_4 , N_5 обладает уже структура с проводниками в форме 1 со значением $\varepsilon_r = 10.2$.

Заключение

Проведен анализ влияния времени травления и изменения ε_r материалов на частотные и временные характеристики связанной МПЛ. Из результатов видно, что с увеличением времени травления, собственные значения \mathbf{C} и \mathbf{Z} уменьшаются, а \mathbf{L} – увеличиваются. Это связано с уменьшением площади поперечного сечения проводника, а также изменением значений ε_r материалов. Выявлено, что увеличение времени травления приводит к изменению формы

напряжения на дальнем конце активного проводника. Для структур с материалом FR-4 видно изменение напряжения у структуры с проводниками формы 3. Наибольшая разница амплитуд напряжений на выходе активной линии наблюдается между сигналами структур с проводниками формы 1 и 3 (разница составила 0.044 В). Увеличение времени травления в зависимости от формы проводников, как увеличивает, так и уменьшает значения N -норм. Так, в случае N_1 выявлено, что максимальное ослабление соответствует проводникам в форме перевернутой трапеции (3).

Анализ частотных характеристик показал, что изменения времени травления и ϵ_r материалов приводит к изменению $f_{ср}$, а также к увеличению максимального ослабления на 10 дБ, соответственно для FR-4 и 2 дБ для AD1000 при электродинамическом моделировании. Так же получено, что для 3 формы проводников сохраняется максимальное ослабление при электродинамическом и квазистатическом моделировании. Так же получено, что изменение диэлектрика в данном исследовании не повлияло на значение максимального ослабления коэффициента передачи.

Рекомендации к применению состоят в том, что при перетравлении проводников уменьшаются геометрические параметры, такие, как ширина проводников. В частности, получено, что при увеличении времени травления уменьшаются собственные значения погонной емкости и индуктивности. Также получено, что 3 форма проводников обладает наилучшими характеристиками с точки зрения помехоподавления. Структура с прямоугольной (1) формой проводников обладает наименьшими значениями погонной емкости. Это оказывает влияние на характеристики связанной МПЛ.

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

Литература

1. Paul C.R., Scully R.C., Steffka M.A. Introduction to electromagnetic compatibility. John Wiley & Sons, Inc., 2022.
2. Violette N. Electromagnetic compatibility handbook. – Springer, 2013.
3. Evangelista J. et al. Radiated and Conducted EMI by RF Fields at Hospital Environment //2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – IEEE, 2021. – С. 1-4.
4. Wei J. et al. NI-MWMOTE: An improving noise-immunity majority weighted minority oversampling technique for imbalanced classification problems // Expert Systems with Applications. – 2020. – Т. 158. – С. 113504.
5. Данилова Е.А. Классификация дефектов печатных плат // Труды международного симпозиума «Надежность и Качество». – 2013. – Т. 1. – С. 325-328.
6. ГОСТ Р 56251 – 2014. Платы печатные. Классификация дефектов. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ. 2014. С. 107.
7. Шихов С. Печатные платы с повышенными требованиями к надежности. Вопросы проектирования // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2013. – №. 2. – С. 164-169.
8. Уайтт К., Рентюк В. Особенности конструирования печатных плат с выполнением требований по ЭМС // Компоненты и технологии. – 2019. – №. 6. – С. 121-128.
9. Кузьмин Н.О., Жечев Е.С. Оценка влияния параметров травления на характеристики однопроводных и многопроводных линий передачи // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11.
10. Nikita K., Zhechev Y. Influence of Etching Time on Per-Unit-Length Parameters of Microstrip Lines // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2022. – С. 1-4.

11. Мурманский, М.С. Исследование влияния изменения относительной диэлектрической проницаемости подложки микрополоскового полосового фильтра на его частотные характеристики // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25–28 апреля 2023 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Том 7. 2023. – С. 94-96.
12. Djordjevic A.R. et al. Wideband frequency-domain characterization of FR-4 and time-domain causality // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2001. – Т. 43. – №. 4. – С. 662-667.
13. AD1000: High Dielectric Constant Laminate // RF Globalnet. URL: <https://www.rfglobalnet.com/doc/high-dielectric-constant-substrate-ad1000-0002>
14. Das P., Mandal K. Multiband Reflection and Transmission mode Linear to Circular Polarizer integrated Microstrip Patch Antenna // 2020 International Symposium on Antennas & Propagation (APSYM). – IEEE, 2020. – С. 7-10.
15. Bielik T., Adamec B., Hottmar V. Determination of FR-4 dielectric constant for design of microstrip band-stop filter purposes // 2019 29th International Conference Radioelektronika. – IEEE, 2019. – С. 1-6.
16. ГОСТ IEC61188-1-2–2013. Печатные платы и печатные узлы проектирование и применение часть1-2. 2014. С.39.
17. Галецкий Ф. Производство печатных плат. Современные технологии // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 1998. – №. 2. – С. 43-46.
18. Tang Y. et al. Study on Wet Chemical Etching of Flexible Printed Circuit Board with 16- μ m Line Pitch // Journal of Electronic Materials. – 2023. – Т. 52. – №. 6. – С. 4030-4036.
19. Noma H., Nakanishi T. Etching process analysis based on etchant flow for high-density build-up substrate // Proceedings of 6th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2004) (IEEE Cat. No. 04EX971). – IEEE, 2004. – С. 289-293.
20. Флеров В.Н. Химическая технология в производстве радиоэлектронных деталей. – Радио и связь, 1988.

21. Куксенко С.П. и др. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – №. 2 (36). – С. 45-50.
22. Baum С.Е. Norms and eigenvector norms // Mathematics Notes. – 1979. – Т. 63. – С. 1-42.

Для цитирования:

Кузьмин Н.О., Мурманский М.С., Жечев Е.С. Оценка влияния производственных дефектов на характеристики связанной микрополосковой линии. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.17>