

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.8>

УДК: 621.372

3D КОНСТРУКЦИИ СВЯЗАННЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СВЧ УСТРОЙСТВАХ (ОБЗОР)

Н.Д. Малютин, Т.Т. Чинь

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

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2023 г.

Аннотация. В обзоре рассматриваются 3D конструкции связанных полосковых линий и их применение в устройствах СВЧ. Отмечается, что 3D конструкции связанных полосковых линий обладают преимуществами по сравнению с другими полосковыми структурами, обусловленными возможностью формирования сильной электромагнитной связи между полосками. Этот результат достигается простыми технологическими методами, такими как установка вертикальной подложки с припаиванием (или сваркой) проводников, ориентированных соответственно горизонтально и вертикально на подложках. В статье кратко освещена история развития и приведена классификация этих конструкций. Проанализированы преимущества и недостатки устройств, построенных на основе таких конструкций. Рассмотрены методы их анализа и улучшения характеристик. Подчеркивается, что трехмерные конструкции связанных полосковых линий представляют собой перспективное направление в развитии технологий СВЧ и могут быть широко применены в различных устройствах.

Ключевые слова: 3D конструкции, связанные линии, СВЧ-устройства, неотражающий полосковый фильтр, направленный ответвитель.

Финансирование: Публикация выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2023-0014.

Автор для переписки: Чинь То Тхань, thanhvodoi1995@gmail.com

Введение

Выбор конструкции связанных полосковых линий из большого многообразия созданных и исследованных вариантов их исполнения зависит от нескольких основных факторов. Первый из них – доступность и реализуемость технологии изготовления. Здесь отдается предпочтение планарным конструкциям связанных линий. Однако планарное расположение проводников СПЛ не всегда позволяет получать заданные параметры устройств. Причины этого могут быть разные, но наиболее важные состоят в получении требуемых первичных и вторичных параметров. Как известно [1-4], к первичным параметрам относятся погонные емкости и индуктивности. Матрицы погонных емкостей \mathbf{C} и индуктивностей \mathbf{L} одинаковых СПЛ при числе связанных проводников $n = 2$ следующий вид [4]

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{11} & -C_{12} \\ -C_{21} & C_{22} \end{pmatrix}, \mathbf{L} = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где C_{11} , C_{22} , L_{11} , L_{22} – собственные емкости и индуктивности, C_{12} , C_{21} , L_{12} , L_{21} – взаимные емкости и индуктивности между проводниками.

Вторичные параметры СПЛ находятся через элементы матрицы \mathbf{C} и \mathbf{L} . Связь между проводниками определяется через коэффициенты емкостей k_C и индуктивностей k_L связи [4]

$$k_C = \frac{C_{12}}{\sqrt{C_{11} \cdot C_{22}}}, k_L = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11} \cdot L_{22}}}. \quad (2)$$

Следующими важными параметрами СПЛ являются относительные эффективные диэлектрические проницаемости синфазного ε_{effe} и противофазного ε_{effo} возбуждения связанных линий:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{effe} &= c^2(L_{11} + L_{12})(C_{11} - |C_{12}|), \\ \varepsilon_{effo} &= c^2(L_{11} - L_{12})(C_{11} + |C_{12}|),\end{aligned}\quad (3)$$

где c – скорость света.

Процесс распространения синфазной и противофазной волн определяется фазовыми скоростями синфазной v_e и противофазной v_o составляющих

$$v_e = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{effe}}}, \quad v_o = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{effo}}}.\quad (4)$$

Волновые сопротивления синфазного Z_{0e} и противофазного Z_{0o} возбуждения

$$\begin{aligned}Z_{0e} &= \sqrt{(L_{11} + L_{12})(C_{11} - |C_{12}|)}, \\ Z_{0o} &= \sqrt{(L_{11} - L_{12})(C_{11} + |C_{12}|)}.\end{aligned}\quad (5)$$

Еще один важный параметр – коэффициент импедансной связи k , определяемый через Z_{0e} и Z_{0o} ,

$$k = (Z_{0e} - Z_{0o}) \cdot (Z_{0e} + Z_{0o})^{-1}.\quad (6)$$

К основным недостаткам СПЛ в планарном исполнении относятся определенные трудности обеспечения заданных достаточно больших коэффициентов связи по емкости k_C , индуктивности k_L и k , неравенство фазовых скоростей синфазных v_e и противофазных v_o волн или наоборот – недостаточно большая разница v_e и v_o при создании, например, фазовращателей на связанных линиях [1].

В настоящей работе представлен обзор литературы, касающейся трехмерных конструкций связанных полосковых линий и устройств на их основе. Основной отличительной особенностью 3D конструкций СПЛ рассматривается наличие ортогонально расположенных подложек и соответственно полосок. Кратко изложены история развития и классификация 3D конструкций СПЛ. Обсуждены преимущества и недостатки рассмотренных устройств на основе таких связанных линий. При характеристике параметров связанных линий далее будем придерживаться терминологии работ [1-4].

1. История развития

По всей видимости, первой 3D конструкцией СПЛ можно считать связанные полосковые линии с лицевой связью [5], поперечное сечение которых показано на рис. 1. Связанные токнесущие полоски 1 и 2 выполняются на верхней и нижней поверхности диэлектрической подложки с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_{r1} . Подложка обычно устанавливается (подвешивается) в корпусе, являющемся экраном. Пространство между экраном и подложкой может заполняться неоднородным диэлектриком с относительными диэлектрическими проницаемостями ϵ_{r2} , ϵ_{r3} . Такая конструкция позволяет получить $k_C, k_L \geq 0,7$, варьировать волновые сопротивления Z_{0e}, Z_{0o} в широких пределах и получать разные эффективные диэлектрические проницаемости синфазного ϵ_{efe} и противофазного ϵ_{efo} режимов возбуждения. Эти свойства связанных линий с лицевой связью позволяют проектировать направленные ответвители с 3 дБ связью, широкополосные частотно-селективные устройства (фильтры) и другие устройства. Их основной недостаток в том, что полоски расположены на противоположных сторонах диэлектрической подложки, которую необходимо монтировать в корпусе в подвешенном состоянии.

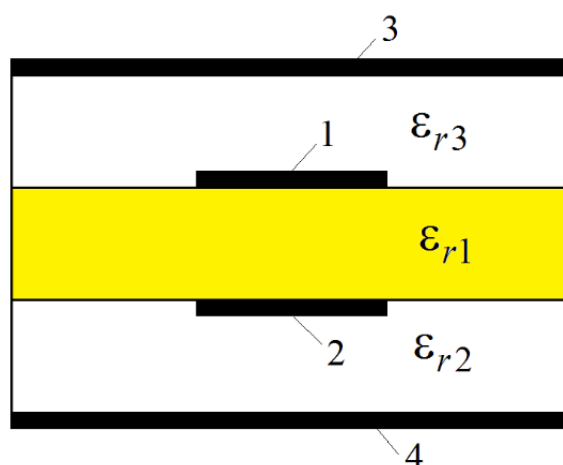
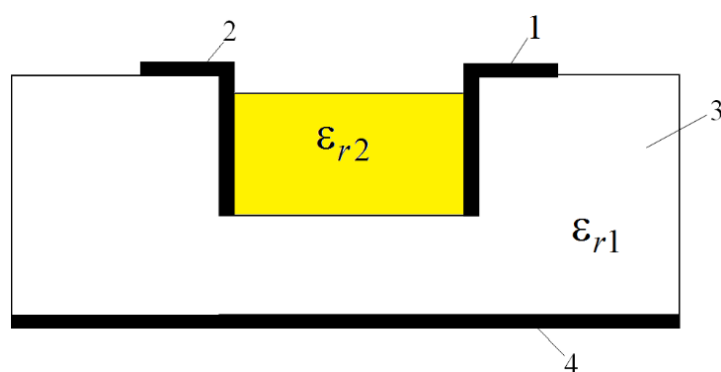
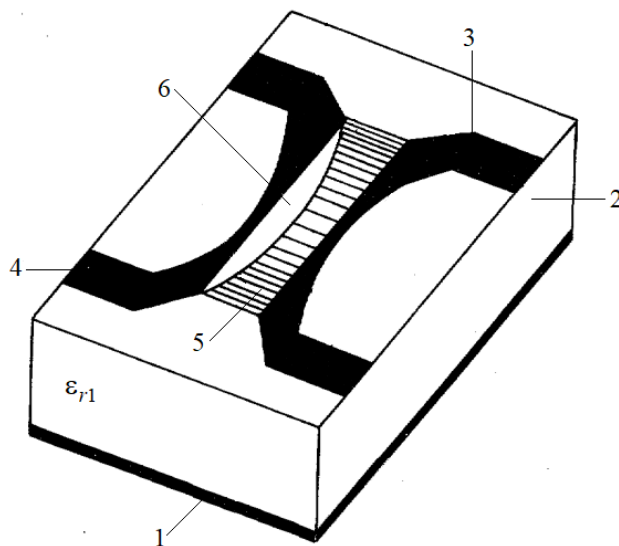


Рис. 1. Поперечное сечение связанных полосковых линий с лицевой связью на подвешенной подложке с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_{r1} ; 1, 2 – токнесущие полоски; 3, 4 – верхняя и нижняя стенки экрана [5]

Дальнейшие идеи использовать трехмерные конструкции полосковых линий были сформулированы и обоснованы, в том числе, в работах [6-10]. На рис. 2а показан один из вариантов 3D конструкции связанных линий в объемном исполнении [6]. На основе данной структуры был разработан трехдецибелльный микрополосковый направленный ответвитель [7] с целью расширения диапазона рабочих частот и повышения технологической эффективности (рис. 2б). Этот тип СПЛ получил название «Рельефные связанные микрополосковые линии».



а



б

Рис. 2. Поперечное сечение связанных полосковых линий 1 и 2, выполненных частично на поверхности диэлектрической подложки 3 и в канавке с диэлектрическим заполнением (а) [6] и трехдецибелльный микрополосковый направленный ответвитель (б), в диэлектрической подложке 2 в области связи полосковых проводников 3 и 4 выполнена канавка 5, боковые поверхности 6 которой, имеющие форму сегмента, металлизированы и соединены каждая с соответствующим полосковым проводником 3 и 4 [7].

Связанные полоски 1 и 2 выполнены в виде буквы Г и перевернутой буквы Г, расположены горизонтальной частью на поверхности подложки 3 с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_{r1} и вертикальной частью в канавке, заполненной диэлектриком с проницаемостью ϵ_{r2} . Наряду с преимуществом возможности варьировать коэффициенты связи k_C и k_L в широких пределах, конструкция рельефных СПЛ имеет недостаток – сложность нанесения полосок внутри канавки. Поэтому в рамках развития концепции объемных интегральных схем [8] искались варианты конструкций, сохраняющие достоинства рельефных СПЛ, но более технологичные. Так были предложены и исследованы связанные полосковые линии с вертикально и горизонтально расположенными подложками 1 и 2 [9, 10] (рис. 3). В работе [9] для обозначения СПЛ такого типа был введен термин «Vertically Installed Planar circuit» (VIP circuit), или просто VIP, т.к. буква P может означать подложку (plate).

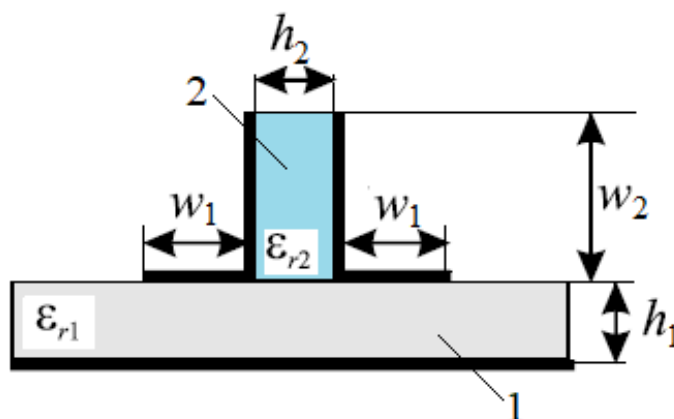


Рис. 3. Поперечное сечение конструкции связанных полосковых линий с вертикально расположенной подложкой (VIP) [6].

Конструкция СПЛ типа VIP имеет весьма важное преимущество по сравнению с другими структурами, связанное с возможностью получения сильной электромагнитной связи между полосками. Это достигается несложным технологическим приемом установки вертикальной подложки путем припаивания (или сварки) проводников, ориентированных горизонтально и вертикально соответственно на подложках 1 и 2.

Такова краткая история истоков появления разнообразных 3D конструкций СПЛ с 1960 года прошлого столетия.

2. Классификация типов 3D конструкций связанных полосковых линий

Использование конструкций связанных полосковых линий широко распространено в современной практике проектирования СВЧ-устройств. СПЛ предоставляют основу для разработки фильтров, фазовращателей, трансформаторов импеданса, направленных ответвителей, модальных фильтров, диплексоров, корректоров и других устройств [6-45]. Многие из указанных устройств могут быть построены с применением 3D конструкций СПЛ, поэтому классификация связанных полосковых линий, в том числе 3D типа, полезна для разработчиков СВЧ компонент и устройств и систем.

По наиболее важным физическим свойствам СПЛ можно разделить по следующим параметрам:

- величина связи между линиями;
- степень различия фазовых скоростей нормальных волн.

Степенью связи между линиями является граница коэффициента связи, определяемая при равных коэффициентах связи по емкости k_C и индуктивности k_L , когда $k_C = k_L = 0,70795$ или $k = 0,70795$. В этом случае считается, что связь составляет 3 дБ. Менее этой границы – связь слабая, более – сильная, а связь 3 дБ считается достаточной для построения направленных ответвителей с равным делением мощности по каналам, неотражающих фильтров и других устройств.

В общем случае в СПЛ распространяется $2n$ собственных волн (мод), где n – количество связанных полосок [46, 47]. Поскольку магнитоэлектрическая среда в СПЛ может быть неоднородна, распространяющиеся волны могут иметь разную фазовую скорость, но, тем не менее, до определенной частоты считают, что в СПЛ распространяются квази-Т-волны [14].

На схеме рис. 4 показана схема классификация 3D конструкций связанных полосковых линий при разделении на подклассы по признакам:

количество проводников; геометрическая форма и расположение проводников; симметрия поперечного сечения. Конструкция 3D, показанная на рис. 3 классифицируется как двухпроводная, регулярная или нерегулярная в зависимости от топологии проводников, без экрана, симметричная в поперечном сечении.

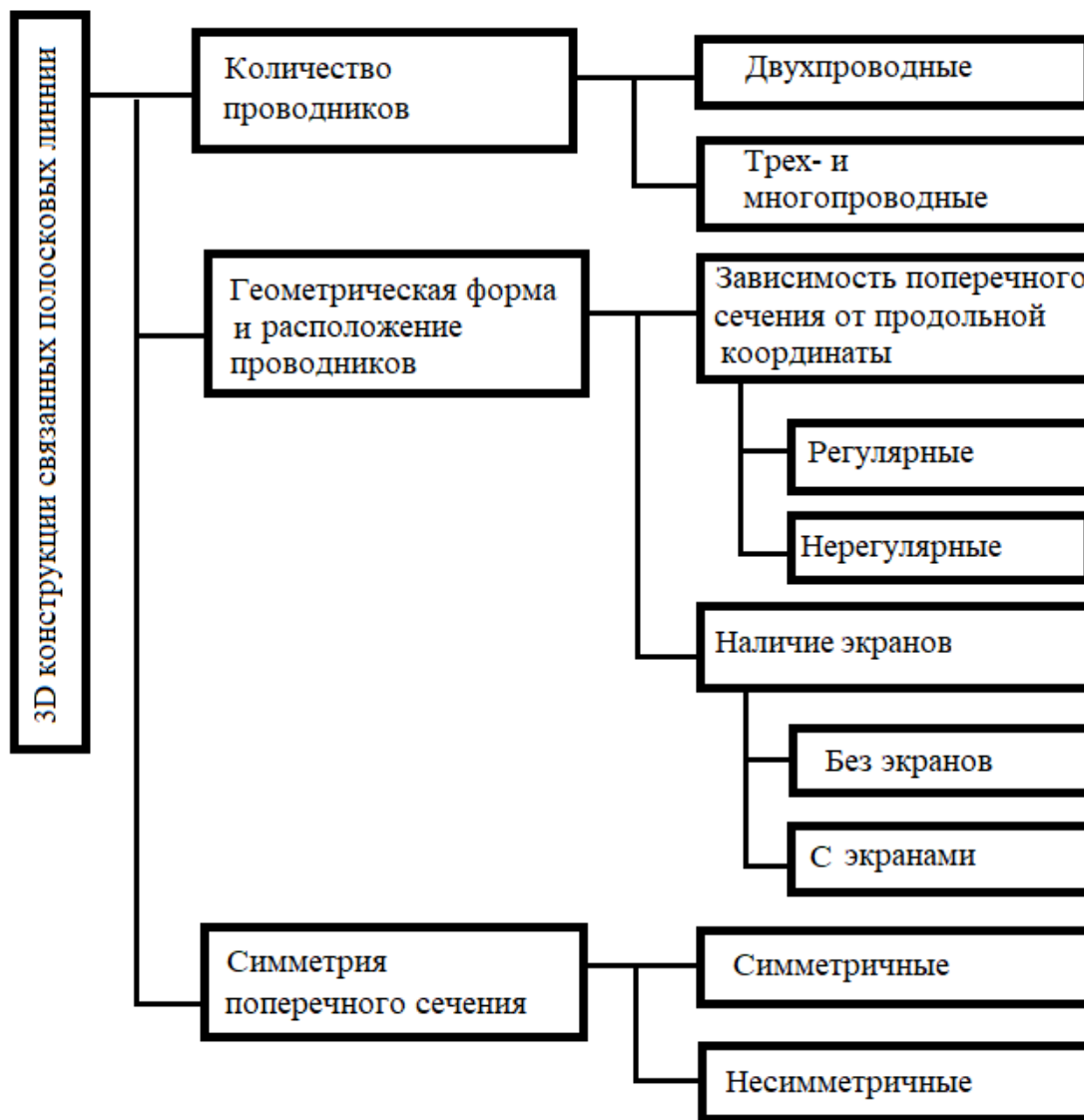


Рис. 4. Классификация 3D конструкций связанных полосковых линий.

Разновидности 3D конструкций СПЛ показаны на рис. 5-9. Конструкция типа VIP (рис. 5) в [9, 10] применена для построения направленного ответвителя, конвертора и полосно-пропускающего фильтра.

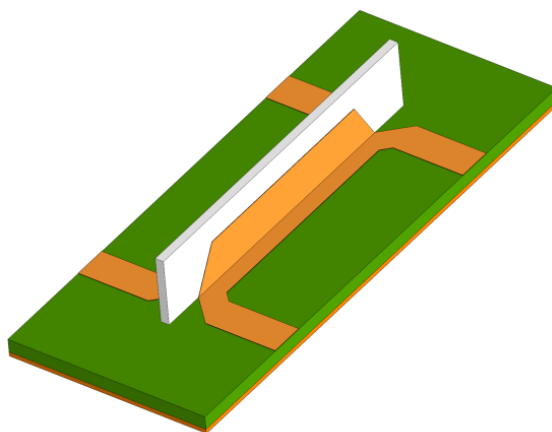


Рис. 5. 3D конструкция СПЛ, описанная в [9, 10], использованная для построения ряда устройств СВЧ, показан направленный ответвитель.

В работе [9] получены частотные характеристики направленного ответвителя с большой неравномерностью коэффициентов передачи и низкой развязкой портов, что связано с неравенством эффективных диэлектрических проницаемостей синфазного и противофазного возбуждения ϵ_{effe} , ϵ_{effo} связанных линий. Поэтому в статье [10] решалась проблема выравнивания ϵ_{effe} , ϵ_{effo} и, тем самым, существенно улучшения частотных характеристик направленных ответвителей.

Конструкция СПЛ с вертикальной подложкой удобна для изготовления нерегулярных СПЛ, которые позволяют получить уникальные частотные характеристики направленных ответвителей и формирователей импульсов [48, 49]. На рис. 6 показана конструкция ступенчато-неоднородных связанных полосковых линий. Частотная зависимость коэффициентов передачи устройства которого позволяет получить неперIODическую зависимость коэффициентов передачи S_{21} , S_{31} . При плавной зависимости первичных параметров нерегулярных СПЛ типа VIP возможно расширение полосы рабочих частот направленных ответвителей вследствие двух причин: за счет обеспечения необходимой зависимости волновых сопротивлений Z_{0e} , Z_{0o} и эффективных диэлектрических проницаемостей синфазного ϵ_{effe} и противофазного ϵ_{effo} . Однако эта задача до настоящего времени не решена в силу ее сложности.

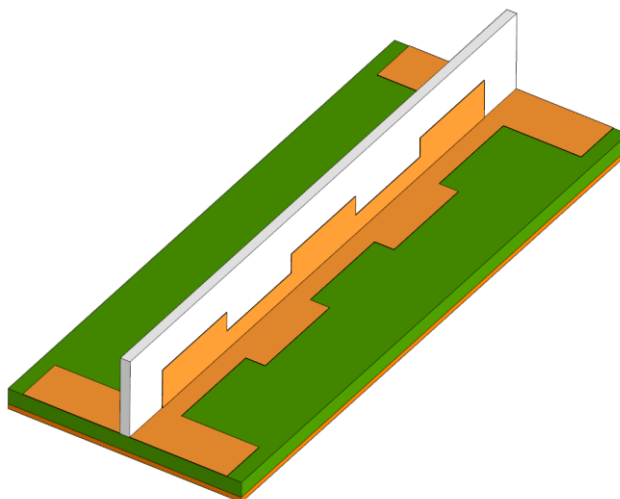


Рис. 6. Конструкция ступечато-неоднородных связанных полосковых линий [48, 49].

Определенный интерес представляют многопроводные связанные полосковые линии с вертикально расположенной подложкой [1]. В указанной публикации рассмотрен управляемый направленный ответвитель на основе многопроводной СПЛ, показанной на рис. 7. Полоски на вертикальной и горизонтальной подложках образуют решетки проводников, имеющих разное назначение. Вертикально расположенные полоски имеют сильную электромагнитную связь и при соединении с горизонтально расположенными полосками образуют эквивалентную двухпроводную СПЛ соответственно с сильной связью.

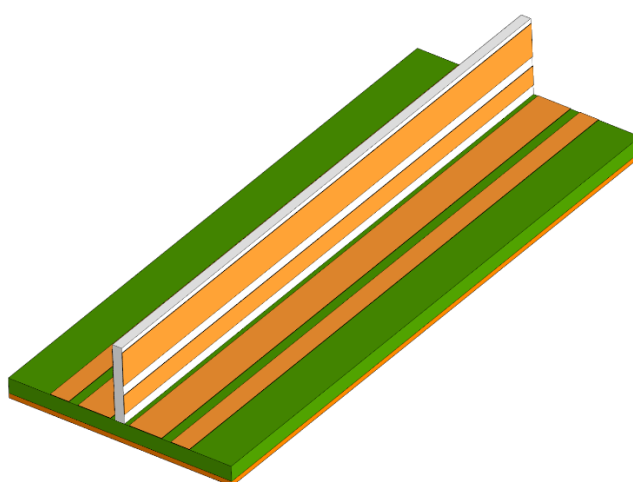


Рис. 7. Конструкция многопроводной СПЛ с вертикально расположенной подложкой. Полоски образуют горизонтальные и вертикальные решетки проводников [1].

Соединение друг с другом горизонтальных полосок позволяет изменять волновое сопротивление структуры $Z_o = \sqrt{Z_{oe} \cdot Z_{oo}}$ и одновременно коэффициенты связи между полосками k_C, k_L .

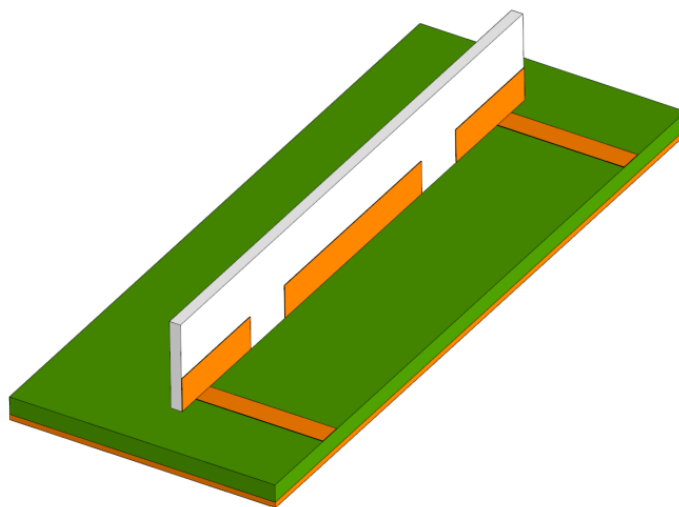


Рис. 8. Конструкция 3D связанных линий с четвертьволновыми отрезками на вертикальной подложке, входящих в схему устройства [9].

Наличие вертикальной подложки позволяет разместить на ней полоски, выполняющие функции резонатора или элемента трансформатора импеданса [9]. На рис. 8 показана конструкция с четвертьволновыми отрезками на вертикальной подложке.

VIP конструкции СПЛ при наличии диэлектриков с большой диэлектрической проницаемостью, как показано в работах [14, 15], позволяют получать большое отношение эффективных диэлектрических проницаемостей $\epsilon_{effo} / \epsilon_{effe}$ и, соответственно, фазовых скоростей $v_e/v_o = \sqrt{\epsilon_{effo} / \epsilon_{effe}}$ синфазной (индекс “e”) и противofазной (индекс “o”) мод. Увеличение $v_e/v_o = \sqrt{\epsilon_{effo} / \epsilon_{effe}}$ до 3 привело к созданию транснаправленного ответвителя [14].

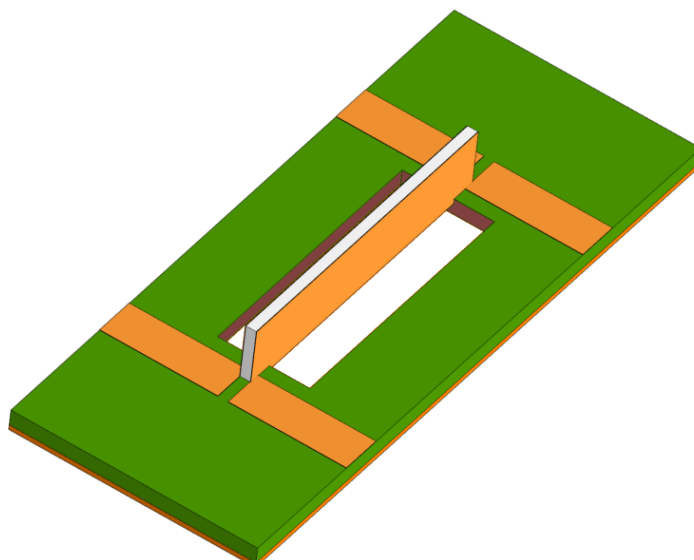


Рис. 9. Конструкция связанных полосковых линий с отношением фазовых скоростей синфазного v_e и противофазного v_o возбуждения $v_e / v_o \approx 3$ [14].

3. Устройства на основе 3D конструкции связанных линий

3.1. Направленные ответвители

В статьях [9, 10] проведен анализ направленного ответвителя VIP-структуры с использованием метода граничных элементов. Эффективные диэлектрические проницаемости и характерные импедансы как для синфазного, так и для противофазного режимов были получены численно. Они были подставлены в формулу матрицы рассеяния для получения параметров симметричного направленного ответвителя. Кроме того, в [9] была составлена упрощенная схема проектирования, которая полезна, поскольку Z_{0e} и Z_{0o} управляются практически независимо путем изменения основной и VIP подложек соответственно. На рис. 10 показана эквивалентная схема НО, а его конструкция на рис. 5.

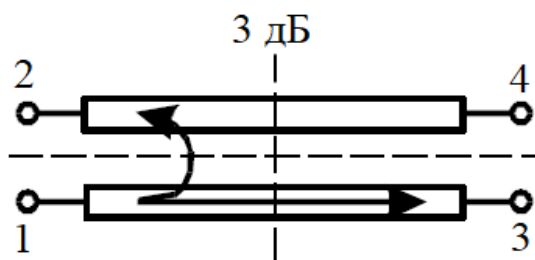


Рис. 10. Эквивалентная схема противонаправленного НО [10].

В работах [14, 15] была предложена новая конструкция транснаправленного ответвителя (ТРО) на связанных линиях с вертикальными элементами. Уникальной особенностью ТРО является то, что в полосе рабочих частот входной сигнал почти не достигает дальнего конца основной линии, а направляется на ближний и дальний концы связанной линии. На рис. 11 показана эквивалентная схема и изготовленный макет ТРО [14].

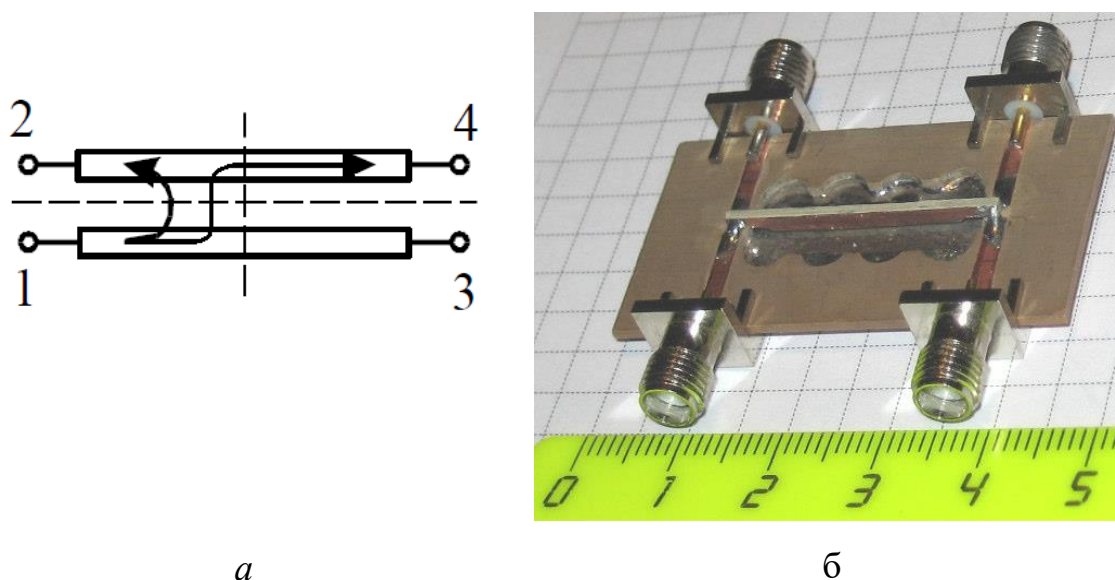
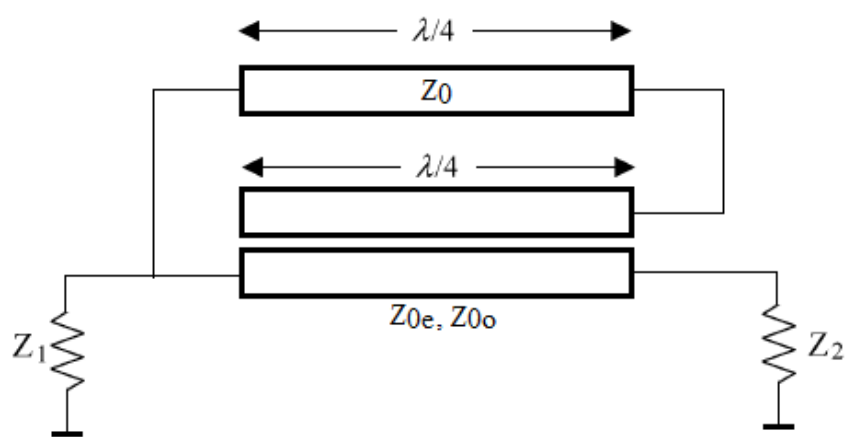


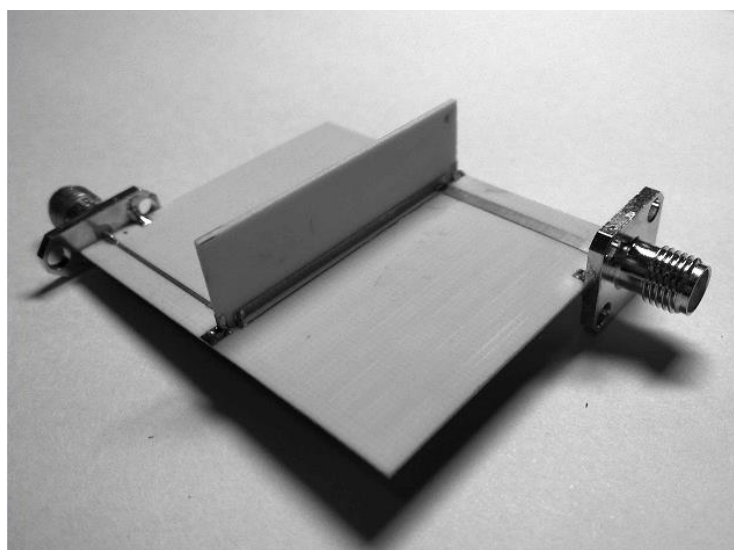
Рис. 11. Эквивалентная схема ТРО (а) и изготовленный макет (б) [14].

3.2. Трансформаторы импеданса и фазовращатели

В работах [11, 12] была использована схема широкополосного трансформатора импеданса с использованием VIP (рис. 12). Так же как в [9, 10], с целью решения задачи обеспечения сильной связи между связанными линиями применена 3D полосковая конструкция. В статье [12] вертикальная вставка используется для реализации широкополосного трансформатора импеданса в [11], чтобы облегчить проблемы, возникающие при использовании фронтальной связи. Изготовленный трансформатор импеданса [12] обеспечивает обратные потери 15 дБ в диапазоне от 0,65 до 1,8 ГГц и обратные потери менее 12 дБ в диапазоне от 1,8 до 2,1 ГГц.



a

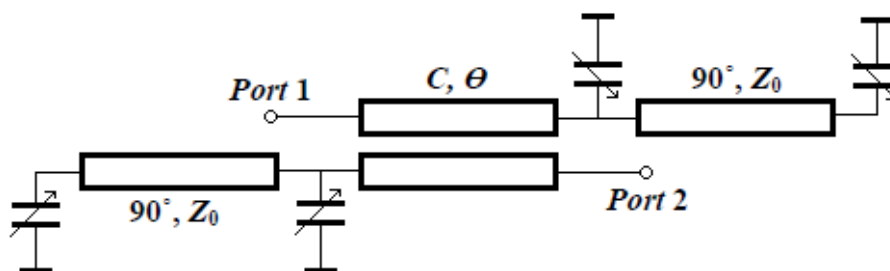


б

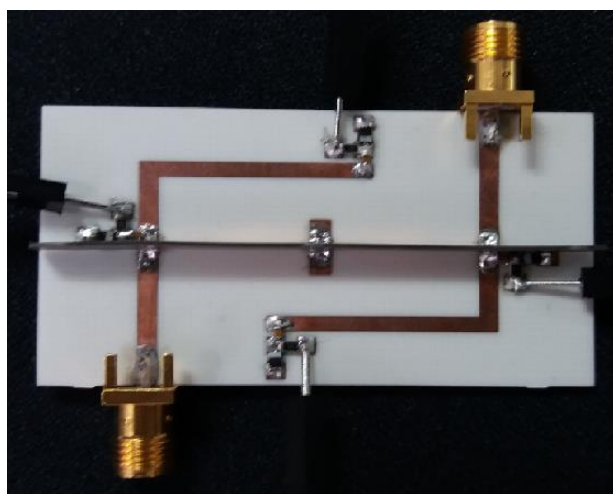
Рис. 12. Эквивалентная схема трансформатора (*a*) и изготовленный макет трансформатора (*б*) [11].

В работе [13] было подчеркнуто, что для современных систем беспроводной связи актуальны широкополосные компактные устройства с расширенным диапазоном фазовой регулировки. Однако существующие конструкции фазовращателей на основе секции связанных линий не удовлетворяют всем требованиям для получения заданной регулировки фазы одновременно. Для решения данных проблем была предложена новая конструкция фазовращателя отражательного типа с использованием вертикально установленной полосковой структуры, включающей отражательную нагрузку, состоящую из двух перестраиваемых конденсаторов и

четвертьволновых линий передачи. На рис. 13 представлена эквивалентная схема данного фазовращателя и изготовленный макет.



a



б

Рис. 13. Эквивалентная схема фазовращателя (*a*) и изготовленный макет (*б*) [13].

3.3. Кольцевые гибридные устройства

Кольцевые гибридные устройства, в том числе с применением VIP СПЛ исследованы в [16-18]. Эти устройства применяются в балансных усилителях, смесителях, умножителях, фазовращателях, аттенюаторах, усилителях мощности и для питания антенн. Традиционные кольцевые гибриды, состоящие только из участков линий передачи, обладают ограниченной полосой пропускания и большими размерами. Для уменьшения габаритных показателей были представлены широкополосные кольцевые гибриды, использующие связанные линии типа VIP [17]. С помощью VIP-соединителя создаются широкополосные многосекционные гибридные кольца. На рис. 14 и 4.15 показаны схема гибридного кольца и изготовленного макета.

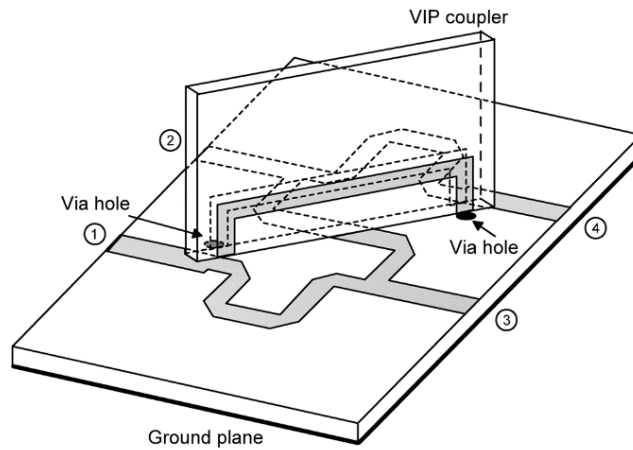


Рис. 14. Трехмерная структура односекционного гибридного кольца с использованием VIP-соединителя. [15].

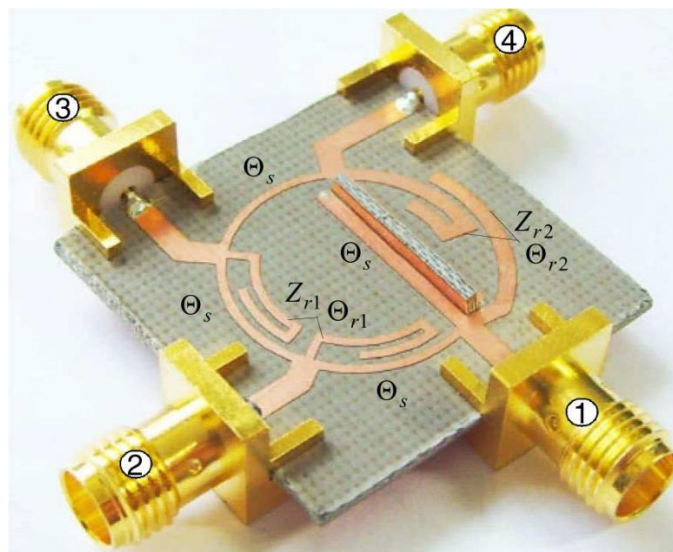


Рис. 15. Изготовленный микрополосковый гибридный малый кольцевой. [16].

3.4. Другие применения VIP

Помимо вышеупомянутых исследований, также было проведено несколько других работ [19-22], в которых использовались трехмерные конструкции связанных линий. Несколько примеров таких конструкций представлены на рисунках 4.16 и 4.17, где демонстрируется широкополосный компактный трансформатор импеданса с блокированием DC на симметричных связанных линиях (WCDC) [19], а также широкополосный направленный ответитель VIP [20]. Работа [21] посвящена описанию разнообразных делителей мощности, включающих СПЛ с вертикальной подложкой, когда необходимо сохранить преимущество планарной технологии и в то же время в

базовом звене связанных линий обеспечить 3 дБ связь для получения требуемых характеристик.

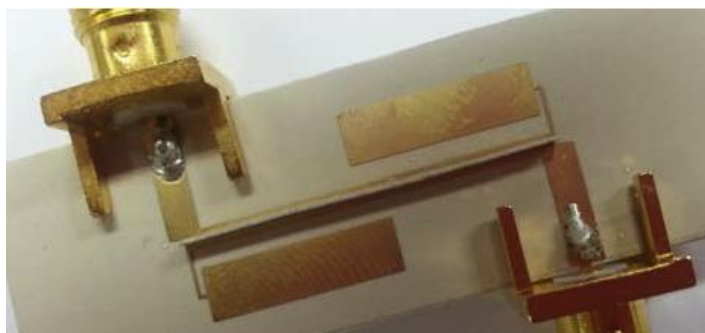


Рис. 16. Широкополосный компактный трансформатор импеданса с блокированием DC на симметричных связанных линиях (WCDC) [17].

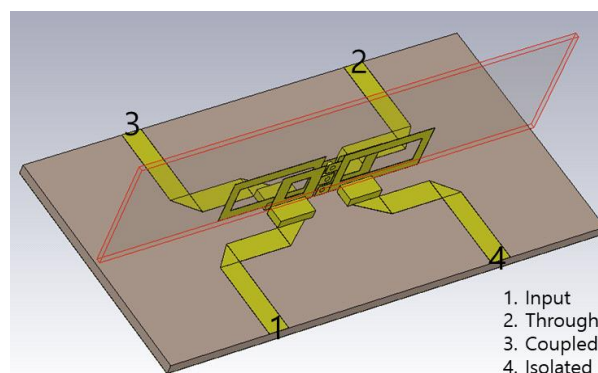
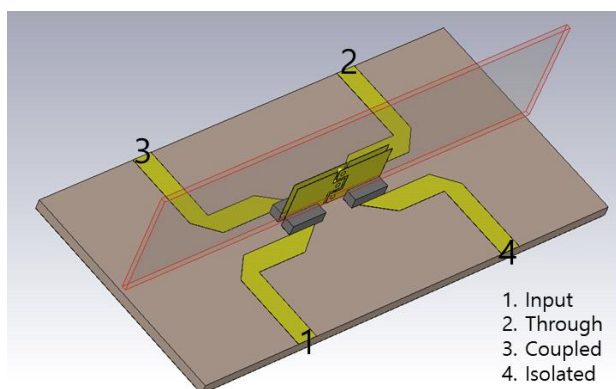
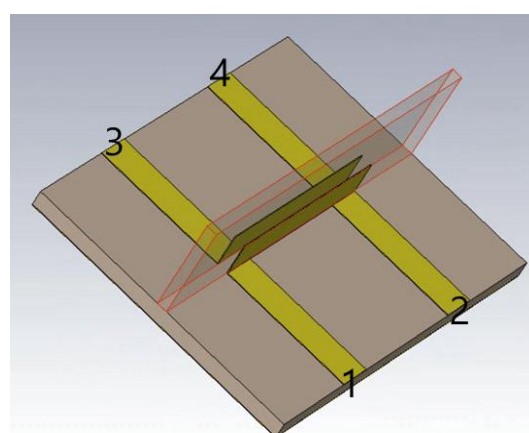
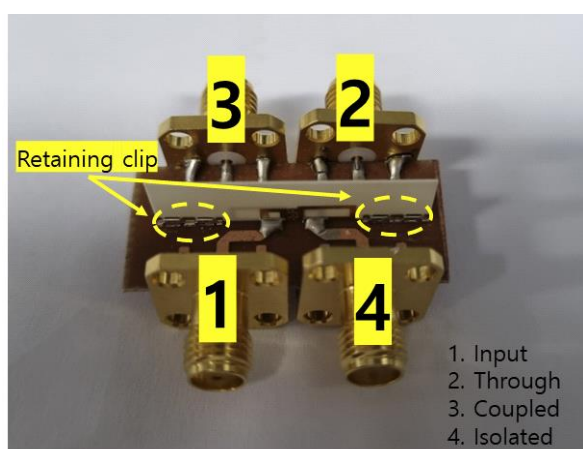


Рис. 17. Направленные ответвители на 3D связанных линиях типа VIP с топологически разным направлением портов [20].

Связанные линии VIP находят применение для построения широкополосных матриц Батлера [22] по причине относительной простоты получения 3 дБ деления мощности и сохранения доступа ко всем фрагментам топологии схем деления.

4. Методы анализа и улучшение характеристик 3D конструкций связанных линий

Строго говоря, рассмотренные конструкции, если преимущественным типом распространяющихся в них волн являются квази-Т-волны, в поперечном сечении имеют 2D измерение. Третьей координатой является продольная ось, совпадающая с направлением токов синфазной и противофазной мод. Введение термина 3D конструкции оправдывает то, что эти конструкции существенно отличаются от планарных, для которых разрабатывается топология элементов. Наличие признака VIP существенно, т.к. возникает еще одно измерение, а именно – топология проводников на вертикальной расположенной полоске.

В отношении 3D конструкций связанных линий используются методы анализа первичных параметров те же, что и для 2D, т.к. с точки зрения математического моделирования электромагнитных полей разница незначительна – они рассматриваются в поперечном сечении полосковых структур, как правило, с неоднородным диэлектриком.

При моделировании полосковых линий в начальном периоде их анализа и применения использовался метод конформных отображений (МКО) [26]. Однако МКО по мере усложнения конструкций стал уступать численным методам, основанным на конечных разностях [28-30]. Тем не менее, МКО при расчете первичных параметров СПЛ VIP-типа получил развитие как метод численных конформных отображений, развитый в ряде публикаций А.Н. Сычева [23, 27] применительно к анализу связанных полосковых линий с вертикальной подложкой. Достаточно жесткая привязка метода к определенному поперечному сечению СПЛ делает метод конформных отображений ограниченным в возможностях поиска новых конструкций, т.к. приходится заново решать задачу отображающих функций для изменившейся конструкции. Но основным преимуществом метода является скорость вычислений. Ведь в конечном итоге анализ СПЛ методом конформных отображений приводит к аналитическим выражениям для расчета первичных параметров. Наиболее сложной задачей при анализе СПЛ является вычисление размеров в поперечном

сечении СПЛ и тех относительных диэлектрических проницаемостей подложек, которые необходимы для получения заданных параметров (задача синтеза). Метод конформных отображений теоретически позволяет решить эту задачу, если построить обратное отображение некоторой канонической структуры на область реального поперечного сечения и имеющихся наборов материалов с разными относительными диэлектрическими проницаемостями. Однако возникающие технологические проблемы изготовления экзотических конструкций и материалов подложек с наперед заданными диэлектрическими проницаемостями заставляют обращаться к решению задач методами параметрической оптимизации. В работах [25, 35, 36] был предложен метод «выращивания» полосковых линий с вертикальной подложкой. Схема вычислений размеров поперечного сечения полосок структуры показана на рис. 18.

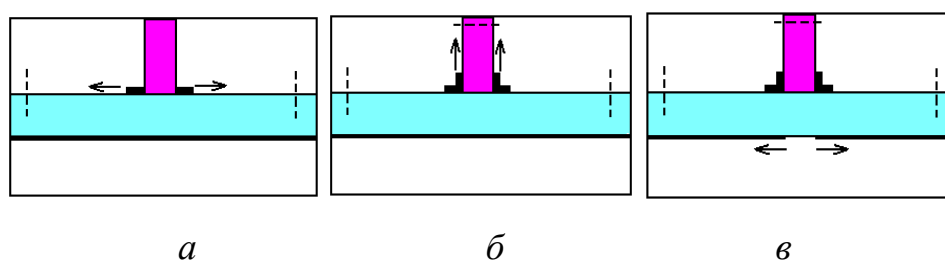


Рис. 18. Последовательность реализации метода «выращивания» полосок структуры [36].

На шаге 1 на горизонтальной подложке размещается «зародыш» в виде достаточно узких полосок так, как это показано на рис. 18а. Вычисляются значения собственной и взаимной емкостей при выбранной подложке с известной диэлектрической проницаемостью $C_{10}^{(1)}$, $C_{12}^{(1)}$ и при воздушном заполнении $C(1)_{10}^{(1)}$, $C(1)_{12}^{(1)}$. Затем полоски «выращиваются» до предельного значения (показано пунктирной линией) и определяются емкости $C_{10}^{(2)}$, $C_{12}^{(2)}$, $C(1)_{10}^{(2)}$, $C(1)_{12}^{(2)}$. На шаге 2 возвращаемся к первоначальному размеру горизонтальной полоски и разрешаем рост вертикальных полосок в соответствии с рис. 18б. Получаем значения емкостей $C_{10}^{(3)}$, $C_{12}^{(3)}$, $C(1)_{10}^{(3)}$, $C(1)_{12}^{(3)}$ и $C_{10}^{(4)}$, $C_{12}^{(4)}$, $C(1)_{10}^{(4)}$, $C(1)_{12}^{(4)}$. На шагах 1, 2 проверяются условия

попадания всех заданных емкостей в интервал их изменения при вариации размера вертикальных полосок. Условия существования решения: $C_{10}^{(0)} \in (C_{10}^{(1)}, C_{10}^{(2)})$; $C(1)_{10}^{(0)} \in (C(1)_{10}^{(1)}, C(1)_{10}^{(2)})$; $C_{12}^{(0)} \in (C_{12}^{(3)}, C_{12}^{(4)})$; $C(1)_{12}^{(0)} \in (C(1)_{12}^{(3)}, C(1)_{12}^{(4)})$. Если эти условия выполняются, то принимается решение о нахождении более точного соответствия параметров тем или иным методом в более узком интервале вариации размеров горизонтальных и вертикальных полосок. В противном случае переходим к шагу 3: возвращаемся в диапазон размера вертикальных полосок, в наибольшей степени соответствующий поставленным условиям. Разрешаем рост зазора S в заземляемом основании (рис. 18в). Проверяем условия попадания всех емкостей в интервал их изменения при вариации зазора. Если данное событие не состоялось, то изменяем исходные параметры и процедура повторяется пошагово. После достижения успеха в вариации размеров решается обратная задача отыскания размеров полосок по известным емкостям. В [36] приведены формулы для вычисления ширины полосок по заданным частичным емкостям.

Более универсальным направлением поиска оптимальных решений при определении первичных параметров 3D СПЛ является применение численных методов для решения уравнения Лапласа [29, 30]. В работе [23] предпринято решение проблемы синтеза связанных полосковых линий типа VIP с гетерогенным (неоднородным) диэлектрическим заполнением. В работе применен метод сеток [29] и оптимизированный алгоритм расчёта полосковых структур [30]. Получены соотношения для приближенного определения размеров и относительных диэлектрических проницаемостей подложек. Эти приближения основываются на существенно отличающейся чувствительности элементов матрицы емкостей к изменению ширины горизонтальных и вертикальных полосок. Собственные емкости горизонтальных полосок почти линейным образом зависят от ширины полосок и в то же время мало влияют на взаимную емкость между полосками. Изменение ширины вертикальных полосок оказывает противоположное действие на элементы матрицы емкостей.

Показана также особенность влияния относительных диэлектрических проницаемостей подложек на частичные емкости и эффективные диэлектрические проницаемости синфазной и противофазной мод. В результате проделанного в работе [32] анализа были получены приближенные решения для отыскания относительных диэлектрических проницаемостей по заданному отношению фазовых скоростей синфазных и противофазных волн.

Идея рассмотреть тонкую структуру электрического поля связанных полосковых линий для анализа частичных емкостей методом конформных отображений развита в монографии [31]. В этой работе излагаются основы комбинированного метода частичных емкостей и конформных отображений (МЧЕКО) для анализа многомодовых полосковых структур. Применение метода дает наглядное физическое представление решаемой задачи, обеспечивает возможность визуализации электрического поля в поперечном сечении структуры. Получены аналитические соотношения для расчёта погонных параметров, а также приводятся сведения о САПР СВЧ-устройств, основанной на оригинальном программном продукте для моделирования одно- и многомодовых полосковых структур Lines Designer.

Как было показано в разделе 2, в 3D связанных полосковых линиях существуют моды, распространяющиеся с существенно разными фазовыми скоростями. Поэтому вопрос о получении точных данных о величине фазовых скоростей является важным для успешного проектирования устройств. Постановка и решение задачи измерения частотной зависимости фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных линиях с неуравновешенной электромагнитной связью изложены в работе [33]. Способ измерения частотной зависимости фазовых скоростей был запатентован [34].

Возникает вопрос о том, как связаны потенциальные частотные характеристики СВЧ-устройств с величиной неравенства фазовых скоростей синфазной моды v_e и противофазной моды v_o . В большом числе работ, в которых рассматривается применение связанных линий, неравенство v_e и v_o не рассматривалось [24] вплоть до конца 70-х годов XX столетия. Но в работах

Томской школы полосковой техники уже в конце 60-х годов прошлого века эффект влияния соотношения v_e/v_o на параметры устройств был обнаружен и использован для улучшения характеристик фазовращателей [37, 38]. Судя по немногочисленным публикациям, в которых решаются задачи совершенствования устройств путем влияния на v_e/v_o , здесь остается много вопросов. Доказательством этого являются публикации [39, 40].

Исследование и создание СВЧ-устройств на связанных линиях предполагает изучение частотных зависимостей параметров матрицы рассеяния и, как дополнение или основное функциональное назначение – особенностей распространения импульсных сигналов [41-45]. Так в [41] была показана возможность разделения частотных спектров при передаче коротких импульсов в порты отрезков СПЛ с минимальным отражением от входа. Высказано также предположение о существовании по продольной координате особых точек, разделяющих направления передачи энергии импульсов по типу противонаправленных и сонаправленных ответвителей.

Исследование временных откликов многопроводных линий передачи с неуравновешенной электромагнитной связью, в том числе 3D конструкций по типу рис. 1, позволило основать новое направление в теории и практике применения полосковых устройств – разработку так называемых модальных фильтров (МФ) [42-45]. Основное назначение МФ состоит в защите радиоэлектронной аппаратуры от воздействия коротких импульсов большой мощности. Накопление материалов исследований МФ стимулирует поиск новых решений на пути расширения областей применения распределено-сосредоточенных цепей и 3D конструкций полосковых линий.

Заключение

Таким образом, в последнее время устройства СВЧ, базирующиеся на трехмерных конструкциях связанных полосковых линий, их применение в практических разработках, стали объектом интенсивных научных исследований и публикаций. Среди таких устройств выделяются направленные ответвители,

трансформаторы импеданса, фазовращатели, кольцевые гибридные устройства и другие.

Анализ преимуществ и недостатков устройств, построенных на основе 3D конструкций, играет важную роль в раскрытии их практического потенциала. Улучшение параметров устройств, в свою очередь, стимулирует разработку и развитие методов анализа, синтеза конструкций связанных линий, их оптимизацию в различных приложениях. Среди таких приложений следует отметить создание транснаправленных ответвителей, фазовращателей. Этот процесс важен для дальнейшего развития и успешного внедрения трехмерных конструкций связанных полосковых линий в современные устройства сверхвысоких частот.

Финансирование: Публикация выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2023-0014.

Литература

1. Малютин Н. Д. Многосвязные полосковые структуры и устройства на их основе. – 1990. – 164 с.
2. Сычев А. Н., Стручков С. М. Системы параметров одинаковых связанных линий с неуравновешенной электромагнитной связью // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – №. 1 (31). – С. 39-50.
3. Сычев А. Н. Анализ и синтез несимметричных связанных линий в однородной диэлектрической среде // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2019. – Т. 22. – №. 1. – С. 11-19.
4. Sychev A. N. et al. Theory of Doubly-Shielded Coupled Lines for Directional Couplers of Various Directivity Types with Impedance Transformation // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2022. Vol. 71. – no. 5. – P. 2104-2117.

5. Cohn S. B. Characteristic impedances of broadside-coupled strip transmission lines //IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1960. – Т. 8. – no. 6. – P. 633-637.
6. Шлее В. Р., Ефименко А. В., Воронин М. Я. Рельефные связанные микрополосковые линии //Радиотехника и электроника. – 1983. – №. 6. – С. 1064-1071.
7. Авторское свидетельство № 653655 А1 СССР, МПК Н01Р 5/18. Трехдецибелльный микрополосковый направленный ответвитель: № 2481377: заявл. 25.04.1977: опубл. 25.03.1979 / Воронин М.Я., Шлее В.Р., Аубакиров К.Я.; заявитель Новосибирский электротехнический институт.
8. Гвоздев В.И., Нефёдов Е.И. Объемные интегральные схемы СВЧ. – М.: Наука, 1985. – 255 с.
9. Konishi Y., Awai I., Fukuoka Y. Newly proposed vertically installed planar circuit and its application //IEEE transactions on broadcasting. – 1987. – №. 1. – С. 1-7.
10. Konishi Y. et al. A directional coupler of a vertically installed planar circuit structure //IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 1988. – Т. 36. – №. 6. – P. 1057-1063.
11. Ang K. S., Lee C. H., Leong Y. C. A broad-band quarter-wavelength impedance transformer with three reflection zeros within passband //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2004. – Т. 52. – №. 12. – P. 2640-2644.
12. Lu W. J., Ang K. S., Mouthaan K. A broadband quarter-wavelength impedance transformer using vertically installed planar coupler //2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – IEEE, 2011. – С. 1-4.
13. Liu W. J. et al. A wideband tunable reflection-type phase shifter with wide relative phase shift //IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2017. – Т. 64. – no. 12. – P. 1442-1446.
14. Sychev A. N. et al. A novel trans-directional coupler based on vertically installed planar circuit //2015 European Microwave Conference (EuMC). – IEEE, 2015. – P. 283-286.

15. Сычев А. Н., Стручков С. М., Рудый Н. Ю. Трёхкаскадный транснаправленный ответвитель X-диапазона // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – №. 4 (38). – С. 12-16.
16. March S. A wideband stripline hybrid ring (correspondence) // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1968. – Т. 16. – no. 6. – P. 361-361.
17. Chi C. H., Chang C. Y. A new class of wideband multisection 180/spl deg/hybrid rings using vertically installed planar couplers // IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 2006. – Т. 54. – no. 6. – P. 2478-2486.
18. Ahn H. R., Kim B. Small wideband coupled-line ring hybrids with no restriction on coupling power // IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 2009. – Т. 57. – no. 7. – P. 1806-1817.
19. Ahn H. R., Tentzeris M. M. Wideband and compact impedance-transforming 90° DC blocks with symmetric coupled transmission-line sections // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2018. – Т. 9. – no. 1. – P. 80-87.
20. Lee K. J. et al. Design of Wideband Vertically Installed Planar (VIP) Coupler // The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. – 2023. – Т. 34. – no. 2. – P. 111-115.
21. Ahn H. R. et al. Coupled lines for wearable power dividers: Coupled transmission-line sections for power dividers in wearable and flexible RF electronics // IEEE Microwave Magazine. – 2020. – Т. 21. – no. 2. – P. 66-87.
22. Chen Q. P. et al. Design of a compact wideband Butler matrix using vertically installed planar structure // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2018. – Т. 8. – no. 8. – P. 1420-1430.
23. Sychev A. N. et al. Modeling of the vertically installed planar coupled lines by the numerical conformal transformation technique // 2017 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications (NEMO). – IEEE, 2017. – P. 106-108.

24. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполусников на СВЧ, 2-изд., перераб. и доп. – М.: Советское радио, 1971. – 388 с.
25. Малютин Н. Д., Ильин А. А., Лоцилов А. Г. Синтез нерегулярных рельефных связанных микрополосковых линий методом «выращивания» //СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (СйМЮо-2010): матер. – 2010. – С. 745-747.
26. Малютин Н. Д., Соломоник И. Ш., Воробьев П. А. Расчет емкости несимметричной зигзагообразной полосковой линии //Известия высших учебных заведений Министерства высшего и среднего специального образования СССР. Радиоэлектроника. – 1971. – Т. 14. – №. 5. – С. 489-493.
27. Sychev A. N., Dolgushin M. E. Analysis of the broad-side coupled lines on the vertical substrate using the numerical conformal transformations //2010 20th International Crimean Conference " Microwave & Telecommunication Technology". – IEEE, 2010. – P. 636-638.
28. Zhao C., Awai I. Applications of the finite difference techniques to the compensated VIP 3 dB directional coupler //IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 1996. – Т. 44. – no. 11. – P. 2045-2052.
29. Fusco V. F. Microwave circuits: Analysis a. computer-aided design / Vincent F. Fusco. - Englewood Cliffs (N. J.): Prentice-Hall intern. Cop.1987. - X, 358 с
30. Малютин Г.А. Оптимизация алгоритма расчёта полосковых структур методом сеток // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2021. – № 1-1. – С. 100-103.
31. Сычев А.Н. Комбинированный метод частичных емкостей и конформных отображений для анализа многомодовых полосковых структур. – Томск: Томск. Гос. Ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 138 с.

32. Лоцилов А. Г. и др. Синтез связанных полосковых линий с гетерогенным диэлектрическим заполнением // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – Т. 25. – №. 1. – С. 7-16.
33. Лоцилов А. Г. и др. Расчетно-экспериментальный метод измерения частотной зависимости фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных линиях с неуравновешенной электромагнитной связью // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – Т. 25. – №. 4. – С. 19-27.
34. Малютин Н.Д. и др. Способ измерения частотной зависимости фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных линиях с неуравновешенной электромагнитной связью. Патент № 2796206 С1 Российская Федерация. Заявлен 21.11.2022. Опубликовано 17.05.2023.
35. Малютин Н.Д., Чинь Т.Т., Малютина А.Н. Решение обратных задач при синтезе связанных полосковых линий с неуравновешенной электромагнитной связью // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2021. – № 3. – С. 196-197.
36. Малютин Н. Д. и др. Регулярные и нерегулярные многосвязные полосковые и проводные структуры и устройства на их основе. – 2012. – 168 с.
37. Воробьев П.А., Соломоник И.Ш., Малютин Н.Д. Управляемый полосковый фазовращатель // А. с. 344784 СССР. Заявлен 26.02.69. Зарегистрирован 06.04.72.
38. Воробьев П.А., Малютин Н.Д., Соломоник И.Ш. Полосковый фазовращатель // А. с. 432843 СССР. Заявлен 05.03.1972. Опубликовано: 1975.07.05
39. Сычев А.Н., Стручков С.М., Рудый Н.Ю. Синтез идеального фазового отношения для ответвителей на связанных линиях по заданному типу направленности // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 15–18.

40. Thanh T. T., Malyutin G. A., Loschilov A. G. Features of frequency response transformations of RLC circuits into opposite response when using them as a load of coupled strip lines with unequal waves phase velocities //2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2022. – P. 1-4.
41. Sychev A. N. et al. Special aspects in interference of in-phase and anti-phase waves with unequal phase velocities in coupled lines under pulse impact //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1679. – no. 2. – P. 022023.
42. Заболоцкий А.М. Временной отклик многопроводных линий передачи // Томск: Том. гос. ун-т, 2007. – 152 с.
43. Костелецкий В. П. и др. Разработка устройства защиты от сверхкоротких импульсов для цепей электропитания бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – №. 8. – С. 1–19.
44. Samoylichenko M. A. et al. Electrical characteristics of a modal filter with a passive conductor in the reference plane cutout //IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2020. – Т. 63. – №. 2. – С. 435-442.
45. Samoylichenko M. A., Gazizov T. R. Additional Pulses in the Time Response of a Modal Filter on a Double-Sided Printed Circuit Board //Electrica. – 2022. – Т. 22. – №. 1. – P. 7–15.
46. Гипсман А. И., Красноперкин В. М., Силин Р. А. Расчёт многополосковых линий и устройств //Антенны/Под ред. АА Пистолькорса. М.: Радио и связь. – 1986. – №. 34. – С. 52-68.
47. Harrington R. F. Losses on multiconductor transmission lines in multilayered dielectric media //IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1984. – Т. 32. – no. 7. – P. 705-710.

48. Малютин Н. Д., Лоцилов А. Г., Семёнов Э. В. Квази-Т-волны в комбинированных структурах на основе нерегулярных линий передачи с сосредоточенными неоднородностями // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2005. – №. 4 (12). – С. 42-49.
49. Малютин Н. Д., Лоцилов А. Г., Семенов Э. В. Квази-Т-волны в комбинированных структурах на нерегулярных связанных линиях // Электронные средства и системы управления. – 2005. – С. 125-129.

Для цитирования:

Малютин Н.Д, Чинь Т.Т. 3D конструкции связанных линий и их применение в СВЧ устройствах. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.8>