

ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ И ЗАЗЕМЛЕННОГО ЭКРАНА НА ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ GaAs МИКРОСХЕМ В 3D-ИНТЕГРИРОВАННЫХ МОДУЛЯХ

© 2025 г. Ф. И. Шеерман^{а, *}, Н. В. Голенева^а, А. А. Коколов^а, Л. И. Бабак^а,
М. В. Черкашин^а, П. В. Панасенко^б, А. В. Волосов^б

^аТомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
просп. Ленина, 40, Томск, 634050 Российская Федерация

^бАО НИИМЭ, ул. Академика Валиева, 6/1, Зеленоград, 124460 Российская Федерация

*E-mail: fish@tusur.ru

Поступила в редакцию 14.09.2023 г.

После доработки 06.02.2024 г.

Принята к публикации 21.02.2024 г.

С использованием электромагнитного моделирования в диапазоне частот до 40 ГГц исследовано влияние покрытия GaAs монокристаллических интегральных схем (МИС) диэлектрическим слоем бензоциклобутена и металлизированным слоем из меди на СВЧ-характеристики микрополосковой (МПЛ) и копланарной (КПЛ) линий передачи, а также симметрирующего трансформатора и полосового фильтра на базе МПЛ. Показано, что в GaAs МИС с указанным покрытием, используемых в 3D-интегрированных модулях, с точки зрения вариации характеристик предпочтительнее применять КПЛ.

Ключевые слова: МИС, интерпозер, микрополосковая линия, копланарная линия, симметрирующий трансформатор, интегрированный модуль, бензоциклобутен

DOI: 10.31857/S0033849425010043, **EDN:** HJLCEQ

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из ключевых направлений в современной СВЧ-микроэлектронике является создание 3D-интегрированных модулей с монокристаллическими интегральными схемами (МИС), изготовленными по различным кремниевым или АЗВ5 технологиям (GaAs, GaN, InP). Потенциальные преимущества таких модулей включают в себя многофункциональность, расширение частотного диапазона, миниатюризацию, снижение энергопотребления и стоимости, повышение надежности.

Один из вариантов конструкции 3D-интегрированного модуля предполагает использование в качестве носителя МИС кремниевой подложки (интерпозера). В этом случае в интерпозере методом травления создают углубления и размещают в них кристаллы СВЧ МИС, которые могут быть изготовлены по различным технологиям (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник (КМОП), кремний-на-изоляторе (КНИ), SiGe БиКМОП, GaAs, GaN и др.). После установки кристаллов кремниевый интерпозер вместе с МИС покрывают дополнительными диэлектрическими слоями. Эти слои, во-первых, выполняют защитную

функцию; во-вторых, в них могут располагаться металлические проводники для соединения МИС между собой, подачи напряжений питания и т.д., а также переходные металлизированные отверстия для осуществления межслойных соединений и заземления.

В частности, широкое распространение в современной микроэлектронике получили диэлектрические покрытия из материалов на основе бензоциклобутена (benzocyclobutene, BCB) [1]. Это обусловлено тем, что такие материалы обладают уникальным сочетанием целого ряда свойств — низкими значениями диэлектрической проницаемости и потерь на высоких частотах, высокой устойчивостью к химическим воздействиям, совместимостью с различными составами металлизаций, низкой температурой отверждения (150...250 °С), высокой степенью выравнивания поверхности, слабым влагопоглощением, хорошей температурной стабильностью и др. В связи с этим материалы BCB применяют в ИС на основе кремниевых и АЗВ5-технологий, для многослойных кристаллов, монтируемых методом перевернутого кристалла, в корпусах, многослойных подложках и печатных платах с высокой плотностью монтажа.

В указанных конструкциях и технологиях ВСВ применяется в качестве изолятора при изготовлении многослойных межсоединений, для изоляции медных или алюминиевых слоев на кремниевых или керамических подложках. Благодаря низкому влагопоглощению и быстрому отверждению, стенки переходных отверстий в ВСВ получаются гладкими и пологими. При помощи ВСВ решаются задачи защиты металлизации с воздушными канавками, создания пассивирующего слоя для защиты от механического воздействия и дополнительного барьера для ионных загрязнений и влаги.

Поверх диэлектрических слоев может быть нанесен также дополнительный металлизированный слой, он тоже является защитным, но одновременно обладает экранирующим действием. Благодаря такому эффекту уменьшаются как распространение собственного СВЧ-излучения 3D-модуля, так и воздействие излучения других находящихся рядом СВЧ-компонентов (например, антенны и т.п.) на сам модуль.

Дополнительные покрывающие слои из диэлектрика и металла выполняют полезные функции, однако при этом изменяют СВЧ-параметры МИС, используемых в 3D-модуле.

Цель данной статьи — исследовать в диапазоне частот до 40 ГГц влияние покрытия GaAs МИС диэлектрическим слоем ВСВ и медным металлизированным слоем на характеристики реализованных в МИС микрополосковой (МПЛ) и копланарной (КПЛ) линий передачи (ЛП), а также более

сложных пассивных устройств на базе МПЛ — симметрирующего трансформатора и полосового фильтра с боковой связью (рис. 1).

2. СТРУКТУРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Изучение влияния диэлектрического и металлизированного покрытий МИС было выполнено с использованием численного метода электромагнитного (ЭМ) моделирования. При этом важное значение для повышения точности и скорости расчетов имеют адекватное задание моделируемой физической структуры и ее параметров, а также выбор метода моделирования. Исследование проводили на примере 3D-модуля, в котором применяются МИС, изготовленные по 0.5 мкм GaAs pHEMT (pseudomorphic High Electron Mobility Transistor — транзисторы с высокой подвижностью электронов) технологическому процессу, толщина подложки GaAs около 100 мкм. Кристаллы МИС в модуле покрыты диэлектрическим слоем ВСВ. На поверхности этого слоя расположен экран — слой медной металлизации (Cu), который заземлен и служит, в частности, для экранирования МИС и модуля от сторонних СВЧ-излучений.

Схема многослойной структуры, позволяющей исследовать характеристики элементов GaAs МИС с покрывающим слоем ВСВ и медной металлизацией, представлена на рис. 2.

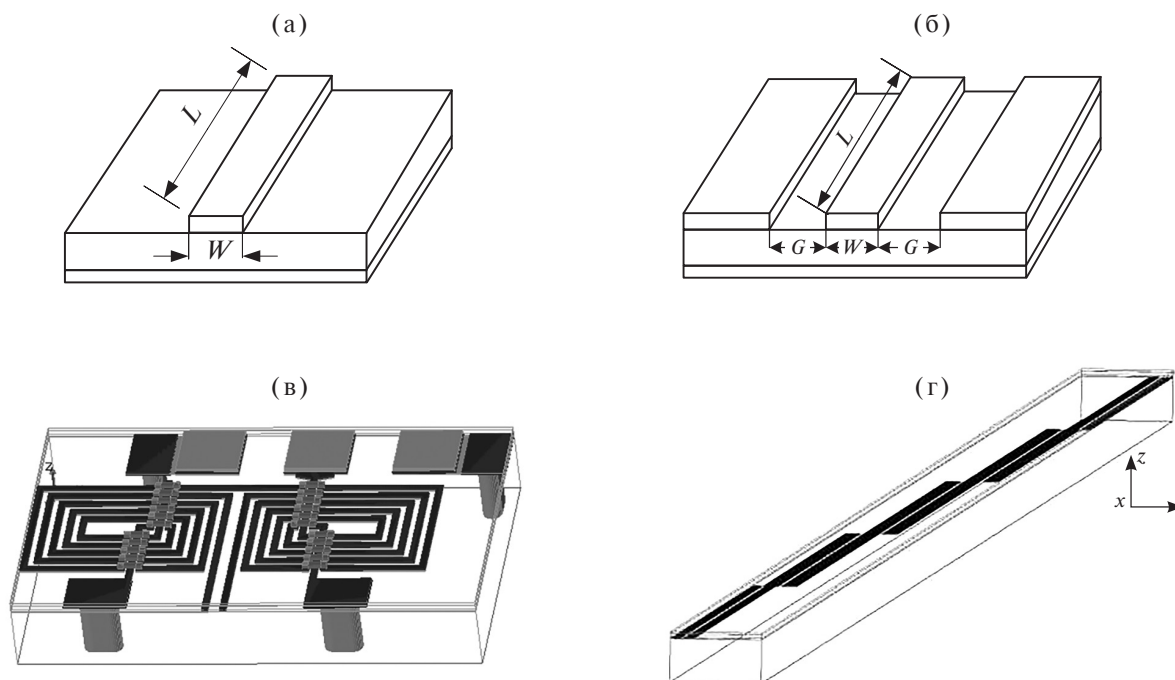


Рис. 1. Пассивные устройства МИС: МПЛ (а); КПЛ (б); симметрирующий трансформатор (в); полосовой фильтр на МПЛ с боковой связью (г).

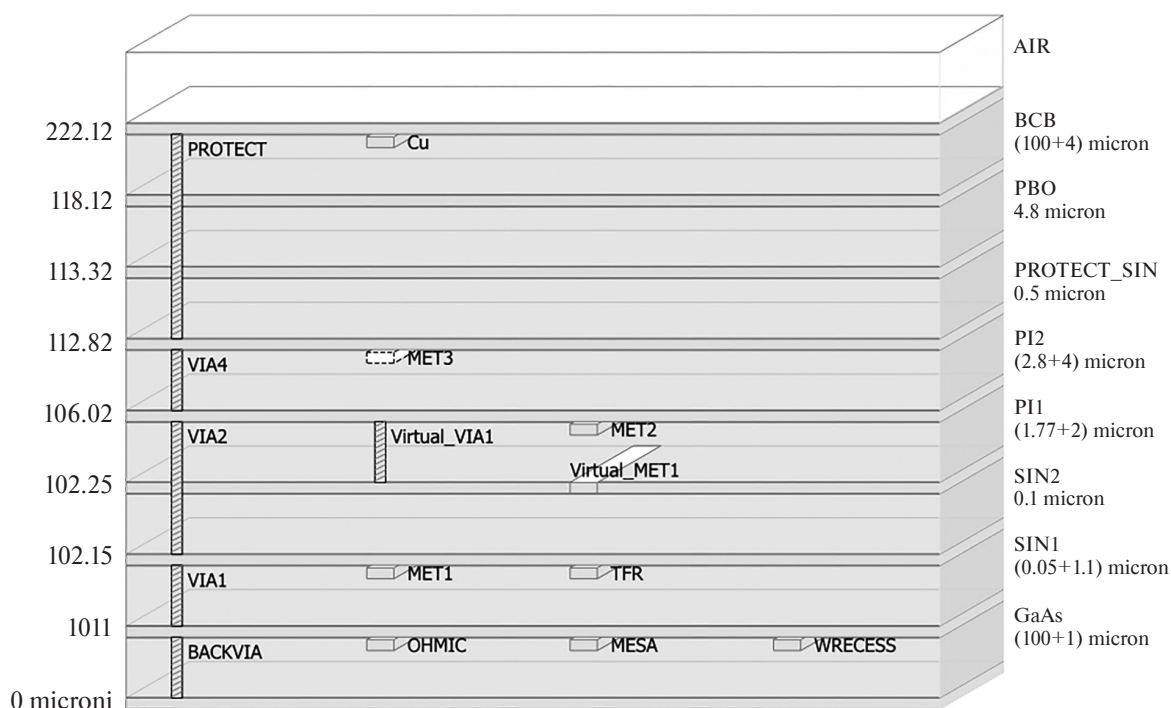


Рис. 2. Схема многослойной структуры для электромагнитного моделирования в программе Momentum в составе САПР ADS.

Структура состоит из нескольких расположенных друг за другом слоев. Самым верхним является слой Cu толщиной 4 мкм и слой BCB, толщина которого может варьироваться при исследовании. Затем следует стек диэлектрических, металлических и полупроводниковых слоев, который с определенной степенью подробности отображает реальную структуру пластины в технологическом процессе 0.5 мкм GaAs pHEMT. Здесь используются три слоя золотой металлизации MET1, MET2 и MET3 разной толщины, а также два типа диэлектриков, из которых выполняются несколько диэлектрических слоев для защитного покрытия и межслойной изоляции. Обратная сторона GaAs-подложки металлизуется золотом и в СВЧ МИС обычно заземляется. В полупроводниковой структуре могут быть выполнены также сквозные металлизированные отверстия для осуществления внешних контактов, межслойных соединений и заземления: PROTECT, VIA1, VIA2, VIA4 и BACKVIA (см. рис. 2).

Оба исследуемых типа ЛП выполняются в слое металла MET1 (см. рис. 2). Если верхний медный экран отсутствует, то МПЛ в МИС имеет почти классическую структуру (см. рис. 1а) — в этом случае заземленная металлизированная обратная сторона GaAs-подложки является элементом ЛП и ЭМ-поле в основном сосредотачивается в высокоомной подложке GaAs (толщина 100 мкм) между

верхним проводником МПЛ в слое MET1 и заземленной плоскостью.

В случае КПЛ (см. рис. 1б) заземленная обратная сторона GaAs-подложки, покрытая металлом, выступает в качестве нижнего экрана (так называемого «обратного» проводника [2]), а ЭМ-поле главным образом сосредоточено между центральным и боковыми проводниками ЛП, расположенными в слое MET1, при этом боковые проводники КПЛ тоже заземлены (см. ниже).

Наличие же на небольшом расстоянии от МПЛ или КПЛ верхнего металлического экрана, соединенного через сквозные металлизированные отверстия с заземленной обратной стороной подложки, оказывает влияние на распределение ЭМ-поля в линии, при этом классическая структура МПЛ превращается в экранированную полосковую линию, а структура КПЛ с «обратным» проводником — в экранированную со всех сторон КПЛ [2].

При расчетах предполагается, что элементы МИС (активные приборы, резисторы, конденсаторы, линии разводки напряжений питания и т.д.), которые реализуются с использованием резистивных слоев TFR и WRECESS, слоев омических контактов OHMIC, межа-слоя MESA, слоев металла MET2 и MET3 (см. рис. 2), либо отсутствуют, либо расположены на достаточно большом расстоянии от исследуемых МПЛ и КПЛ. Поэтому указанные слои не влияют на

Таблица 1. Обозначение и параметры основных слоев полупроводниковой структуры при ЭМ-моделировании характеристик ЛП

| Обозначение | Назначение | Толщина, мкм | σ , См/м | $R_{\text{пов}}, \frac{\text{Ом}}{\square}$ | ϵ_r | $\text{tg}\delta$ |
|---|-----------------------|--------------|------------------|---|--------------|-------------------|
| Cu | Верхний медный слой | 4.0 | $5.8 \cdot 10^7$ | 0.0043 | — | — |
| BCB | Слой BCB | 5...100 | — | — | 2.5 | 0.002 |
| PBO | Защитное покрытие 1 | 4.80 | — | — | 2.9 | 0.01 |
| PROTECT_SiN (Si_3N_4) | Защитное покрытие 2 | 0.50 | — | — | 6.9 | 0.001 |
| PI2 | Межслойный диэлектрик | 2.80 | — | — | 2.9 | 0.001 |
| PI1 | Межслойный диэлектрик | 1.77 | — | — | 2.9 | 0.001 |
| SIN2 (Si_3N_4) | Межслойный диэлектрик | 0.10 | — | — | 6.9 | 0.001 |
| SIN1 (Si_3N_4) | Межслойный диэлектрик | 0.05 | — | — | 6.9 | 0.001 |
| MET1 (Au) | Слой первого металла | 1.10 | $4.1 \cdot 10^7$ | 0.026 | — | — |
| GaAs | Высокоомный слой GaAs | 100 | — | — | 12.9 | 0.001 |

Примечание: для слоев металла σ — проводимость слоя, $R_{\text{пов}}$ — поверхностное сопротивление в Омах на квадрат; для слоев диэлектрика ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость, $\text{tg}\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

характеристики ЛП и, соответственно, не принимая во внимание в процессе моделирования.

Обозначение и параметры основных слоев, учитываемых при ЭМ-моделировании ЛП, приведены в табл. 1.

Исследуемые ЛП представляют собой планарные структуры, которые образованы металлизированными слоями, заключенными между слоями диэлектрика. В этом случае можно существенно ускорить численное моделирование, используя так называемые 2.5D-методы, одним из которых является метод моментов [3]. Нами для ЭМ-моделирования использовалась реализующая данный метод программа Momentum в составе САПР ADS. При анализе ЛП в частотном диапазоне до 40 ГГц следует учитывать изменение характеристик диэлектриков ϵ_r и $\text{tg}\delta$ в зависимости от частоты. Влияние частотной дисперсии на свойства диэлектриков нами описывается с помощью модели Свенссона—Джорджевича [4, 5]. Программа Momentum также учитывает зависимость проводимости металлических слоев от частоты.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Рассмотрим характеристики МПЛ и КПЛ, выполненных в GaAs МИС, при нанесении на интегральную схему слоя BCB и металлизированного слоя — заземленного медного покрытия (экрана).

Моделирование обоих типов ЛП выполнялось в следующем порядке. После задания всех геометрических и физических параметров структуры на рис. 2 с помощью программы Momentum в частотном диапазоне от 0.1 до 40 ГГц были рассчитаны параметры рассеяния S_{11} и S_{21} ЛП. Параметр S_{11} является комплексным коэффициентом отражения на входе, а параметр S_{21} — комплексным коэффициентом передачи отрезка ЛП. Кроме того, было вычислено значение волнового сопротивления ЛП Z_0 . Рассмотрены случаи покрытия GaAs МИС как обоими дополнительными слоями (слой BCB и медный металлизированный слой), так и только слоем BCB. При этом смоделированы слои BCB разной толщины (5...100 мкм) над слоем PBO (см. рис. 2), толщина верхнего слоя Cu предполагалась фиксированной (4 мкм).

Проанализируем полученные результаты численного моделирования МПЛ с нанесенными на МИС слоем BCB и металлизированным верхним экраном. Исследовалась линия передачи длиной $L = 2700$ мкм с шириной верхнего (сигнального) проводника $W = 70$ мкм (см. рис. 1а), при отсутствии слоя BCB и верхнего экрана такое значение W примерно соответствует волновому сопротивлению 50 Ом. Заземление верхнего экрана для СВЧ-сигнала осуществляется путем его соединения с заземленной обратной стороной GaAs-подложки с помощью сквозных металлизированных отверстий. Указанная конструкция была смоделирована в виде медного экрана, длина которого 2860 мкм,

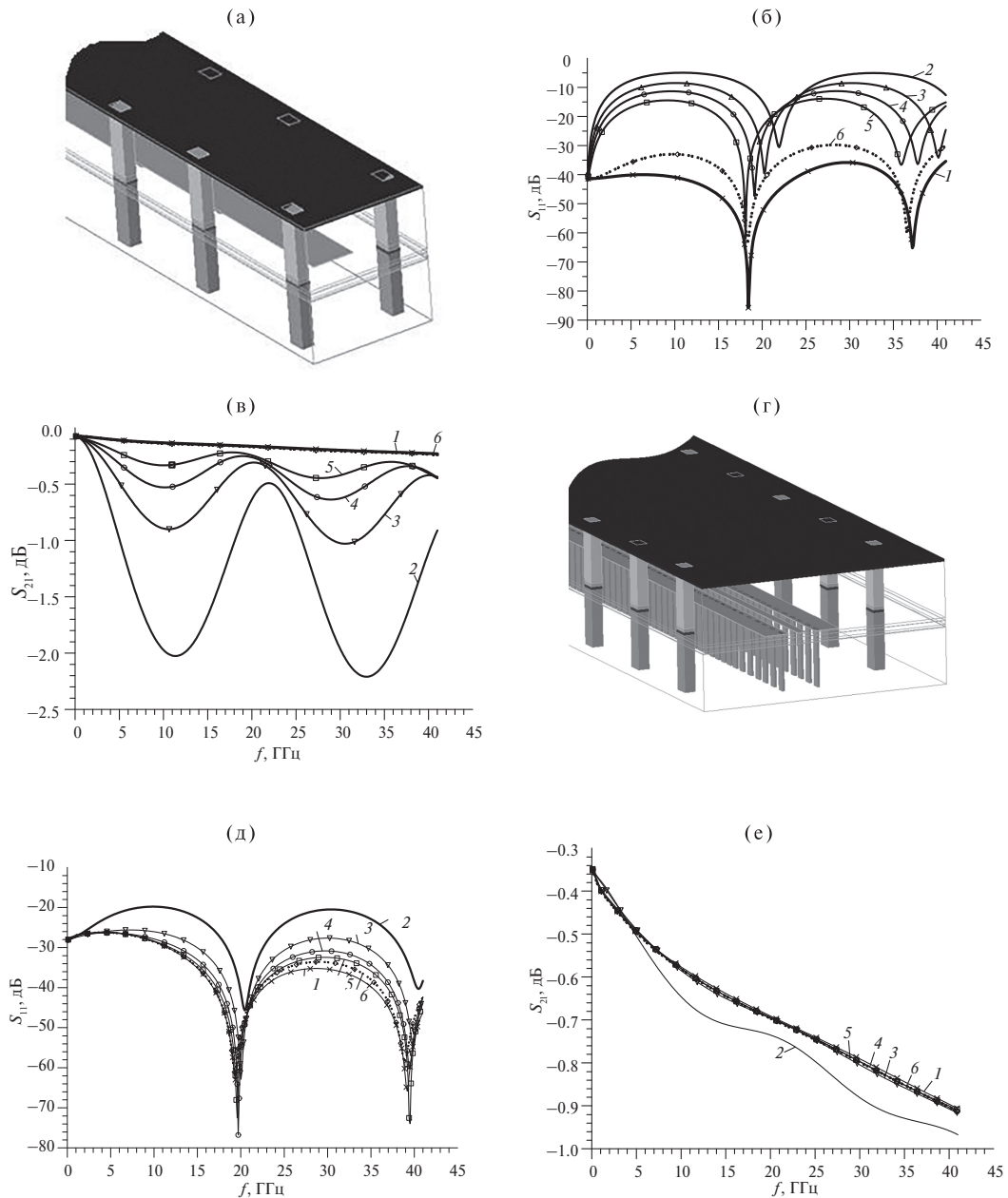


Рис. 3. Конструкция для моделирования линии передачи с верхним экраном в GaAs МИС и частотные зависимости параметров $|S_{11}|$, $|S_{21}|$ для МПЛ (а–в) и КПЛ (г–е): без ВСВ (1), со слоем ВСВ при $t = 5$ мкм (2), 25 мкм (3), 50 мкм (4), 100 мкм (5) и 100 мкм (без ВСВ) (6).

ширина 210 мкм. Экран размещен сверху слоя ВСВ над поверхностью МИС, при размере сквозных отверстий прямоугольного сечения 30×20 мкм и расстоянии между ними 170 мкм (рис. 3а). Для моделирования сквозных металлизированных отверстий были использованы элементы PROTEST, VIA4, VIA2, VIA1 и BACKVIA (см. рис. 2).

На рис. 3б, 3в показаны результаты моделирования S -параметров МПЛ с медным верхним экраном при

значениях толщины слоя ВСВ $t = 5, 25, 50$ и 100 мкм. Для сравнения дополнительно приведены результаты только со слоем ВСВ при $t = 100$ мкм (без экрана), а также без обоих слоев ВСВ и Cu. Как видно из рис. 3б, 3в, в последнем случае МПЛ хорошо согласована с 50-омным трактом (на частоте $f = 30$ ГГц $|S_{11}| = -36$ дБ), а потери в линии малы (при $f = 40$ ГГц $|S_{21}| = -0.23$ дБ). Нанесение слоя ВСВ толщиной 100 мкм мало влияет на характеристики МПЛ ВСВ (при $f = 30$ ГГц величина $|S_{11}|$ увеличивается до -30 дБ,

а при $f = 40$ ГГц $|S_{21}|$ уменьшается лишь на 0.01 дБ). Однако при наличии обоих слоев — ВСВ и металлизированного экрана — характеристики МПЛ начинают сильно зависеть от толщины ВСВ t . В частности, при наиболее тонком слое $t = 5$ мкм согласование на входе линии резко ухудшается ($|S_{11}|$ растет до -5 дБ), а частотная зависимость коэффициента передачи $|S_{21}|$ становится периодической, это связано с возрастанием отражений в линии.

Аналогичным образом было осуществлено моделирование КПЛ с волновым сопротивлением около 50 Ом, которая имела следующие значения геометрических параметров: длина $L = 2700$ мкм, ширина центрального проводника $W = 15$ мкм, расстояние между ним и боковыми проводниками $G = 17.5$ мкм (см. рис. 16). При этом был использован верхний медный экран 2900×520 мкм, заземление которого (соединение с обратной металлизированной стороной подложки) выполнено с помощью сквозных отверстий PROTECT, VIA4, VIA2, VIA1 и BACKVIA, боковые проводники КПЛ заземлены с помощью отверстий VIA1 и BACKVIA, размер прямоугольных сквозных отверстий 40×20 , расстояние между отверстиями 160 мкм (см. рис. 3г).

В соответствии с результатами вычислений (рис. 3д, 3е) можно сделать вывод, что верхний слой ВСВ и медный экран оказывают гораздо меньшее влияние на КПЛ, чем на МПЛ: лишь при самой малой толщине ВСВ $t = 5$ мкм на частоте $f = 30$ ГГц коэффициент отражения $|S_{11}|$ возрастает до -20 дБ, а потери в линии при $f = 40$ ГГц увеличиваются с 0.90 до 0.96 дБ. Однако обращает на себя внимание тот факт (рис. 3в и 3е), что в случае толстых слоев ВСВ ($t = 100$ мкм) удельные потери в МПЛ гораздо меньше, чем в КПЛ — на частоте 40 ГГц они соответственно равны 0.85 и 3.33 дБ/см. Это обусловлено тем, что ширина центрального проводника W в КПЛ гораздо меньше, чем в МПЛ.

Из рис. 3б, 3д также следует, что для МПЛ и КПЛ при наличии верхнего экрана и уменьшении толщины слоя ВСВ минимумы частотной зависимости $|S_{11}|(f)$ сдвигаются в сторону более высоких частот. Это указывает на увеличение фазовой постоянной $\beta = 2\pi/\lambda_w$ и уменьшение длины волны λ_w в ЛП: для $t = 100$ мкм примерно на 19% в случае МПЛ и на 5% в случае КПЛ.

Моделирование также показало, что, хотя волновое сопротивление Z_0 КПЛ и особенно МПЛ (с экраном) сильно зависят от толщины слоя ВСВ, однако частотная дисперсия материалов ЛП оказывает слабое влияние на величину Z_0 . Например, при наиболее тонком слое ВСВ $t = 5$ мкм и наличии экрана волновое сопротивление МПЛ изменяется с 25.72 Ом на частоте 8 ГГц до 28.6 Ом на частоте 40 ГГц, а волновое сопротивление КПЛ на этих частотах равно 45.23 и 45.53 Ом. В то же время при отсутствии слоя ВСВ и экрана для МПЛ значение Z_0 на частотах 8 и 40 ГГц составляет соответственно

49.97 и 48.47 Ом, а для КПЛ — 50.30 и 49.73 Ом. Это позволяет удобно представить результаты расчетов в виде зависимости среднего значения волнового сопротивления Z_0 на частотах X-диапазона ($f = 8...12$ ГГц) и Ka-диапазона ($f = 30...40$ ГГц) от толщины слоя ВСВ t с экраном (рис. 4а).

Частотные поддиапазоны выбраны с практической точки зрения как наиболее распространенные для применения GaAs МИС.

Важный вывод из результатов моделирования состоит в том, что при наличии заземленного верхнего экрана характеристики МПЛ гораздо более чувствительны к толщине слоя ВСВ, чем характеристики КПЛ. В частности, при вариации t от 5 до 100 мкм волновое сопротивление МПЛ изменилось почти в два раза, в то время как для 50-омной КПЛ изменение Z_0 не превысило 10%. При этом даже при максимальной толщине ВСВ $t = 100$ мкм экран сильно снизил исходное волновое сопротивление МПЛ (с 50 до 41.3...41.6 Ом).

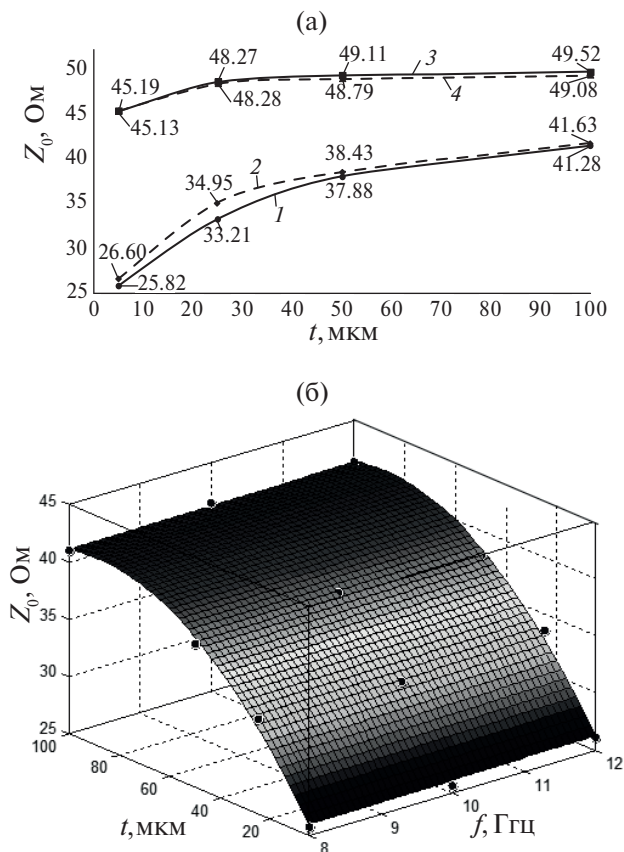


Рис. 4. Зависимости среднего значения волнового сопротивления МПЛ (1, 2) и КПЛ (3, 4) с экраном в X- (1, 3) и Ka-диапазонах (2, 4) от толщины t слоя ВСВ (а), цифры возле точек обозначают средние в указанных частотных поддиапазонах величины Z_0 , в Ом; поверхность зависимости волнового сопротивления МПЛ от t и f для частотного диапазона 8...12 ГГц (б).

Рассмотренные эффекты физически объясняются следующим. В МПЛ (см. рис. 1а) наличие сверху дополнительного диэлектрического слоя с $\epsilon_r = 2.5$ и заземленного экрана значительно увеличивает погонную емкость ЛП, что в свою очередь приводит к уменьшению Z_0 . В отличие от этого, в КПЛ (см. рис. 1б) ЭМ-поле распространяется не только в верхнем и нижнем слоях диэлектрика, но также и между центральным проводником ЛП и боковыми проводниками. Поэтому при размещении экрана с дополнительным слоем ВСВ характеристики ЛП изменяются сравнительно мало. Из результатов моделирования также следует, что использование покрытия МИС из дополнительных слоев диэлектрика и металла не препятствует возможности получения разных значений волнового сопротивления МПЛ и КПЛ, что достигается путем изменения геометрических параметров ЛП.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что с точки зрения минимальных вариаций характеристик в СВЧ МИС, используемых в 3D-интегрированных модулях с покрытием, предпочтительнее применять ЛП (а также согласующие цепи, фильтры и т.д.) на базе КПЛ. В то же время в целом в связи с меньшей шириной центрального проводника потери в КПЛ больше, чем в МПЛ.

В случае применения МПЛ значительное влияние медного экрана со слоем ВСВ на волновые сопротивления и фазовые длины отрезков ЛП необходимо учитывать еще на этапе проектирования МИС. Здесь удобно использовать математические модели, определяющие зависимости электрических параметров МПЛ от толщины слоя ВСВ и частоты при заданных геометрических размерах ЛП.

В качестве примера в табл. 2 для двух частотных поддиапазонов представлены модели волнового сопротивления МПЛ с диэлектрическим и медным слоями покрытия при ширине проводника ЛП $W = 70$ мкм. Модели построены с помощью программы MATLAB и имеют вид двумерных полиномов переменных f и t (f в ГГц, t в мкм), максимальная ошибка расчета Z_0 составляет 0.8% для диапазона 8...12 ГГц и 0.33% для диапазона 30...40 ГГц. Поверхность зависимости волнового

сопротивления МПЛ от t и f в диапазоне 8...12 ГГц представлена на рис. 4б.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИММЕТРИРУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА И ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА

Для более полной картины было изучено также влияние слоя ВСВ с заземленным экраном на характеристики двух типов пассивных СВЧ-устройств, реализуемых с использованием МПЛ в МИС на основе 0.5 мкм GaAs рНЕМТ технологии, а именно, симметрирующего трансформатора (СТ) и полосового фильтра.

Симметрирующие трансформаторы широко используются в СВЧ-устройствах для преобразования несимметричного тракта в дифференциальный и обратно — например, в двойных балансных смесителях, удвоителях частоты и т.п. На рис. 1в представлена исследуемая конструкция интегрального СТ типа Маршанда на связанных МПЛ [6]. СТ размещается на подложке GaAs и спроектирован для частотного диапазона 8...12 ГГц. Трансформатор согласован в 50-омном тракте и имеет габариты 0.75×0.44 мм. В идеальном СТ на обоих его выходах амплитуды сигналов должны быть равны между собой, а разность фаз $\Delta\phi$ — составлять 180° .

При моделировании СТ представляется в виде шестиполюсника со входом 1 и выходами 2 и 3. Он характеризуется частотными зависимостями коэффициентов передачи S_{21} и S_{31} , по которым определяются амплитудный и фазовый разбалансы на выходах СТ:

$$\delta S[\text{дБ}] = |S_{21}[\text{дБ}] - S_{31}[\text{дБ}]|; \delta\phi = |\Delta\phi - 180^\circ|,$$

$$\text{где } \Delta\phi = |\arg S_{21} - \arg S_{31}|.$$

Результаты расчета характеристик СТ представлены на рис. 5 и 6.

В исходном состоянии (без слоя ВСВ и экрана) полоса пропускания СТ при снижении коэффициента передачи на 1 дБ достигает 6...16 ГГц. При этом на частоте 9.5 ГГц $S_{21} = -3.75$ дБ и $S_{31} = -3.95$ дБ, т.е. потери мощности сигнала в исходном СТ (относительно идеального значения -3 дБ) составляют почти 1 дБ. При вариации толщины слоя ВСВ от 5

Таблица 2. Коэффициенты для полиномиальных моделей волнового сопротивления МПЛ с ВСВ-покрытием и экраном в виде $Z_0(f, t) = p_{00} + p_{10}f + p_{01}t + p_{20}f^2 + p_{11}ft + p_{02}t^2 + p_{21}f^2t + p_{12}ft^2 + p_{03}f^3$

| p_{00} | p_{10} | p_{01} | p_{20} | p_{11} | p_{02} | p_{21} | p_{12} | p_{03} |
|---|----------|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Коэффициенты полинома для диапазона 8...12 ГГц | | | | | | | | |
| 32.32 | -1.964 | 0.3382 | 0.1035 | 0.04121 | -6.221×10^{-3} | -2.113×10^{-3} | 7.522×10^{-6} | 2.608×10^{-5} |
| Коэффициенты полинома для диапазона 30...40 ГГц | | | | | | | | |
| 46.41 | 0.1878 | -0.03261 | -3.478×10^{-3} | -1.671×10^{-4} | 6.891×10^{-4} | 3.268×10^{-6} | -2.342×10^{-7} | -3.967×10^{-6} |

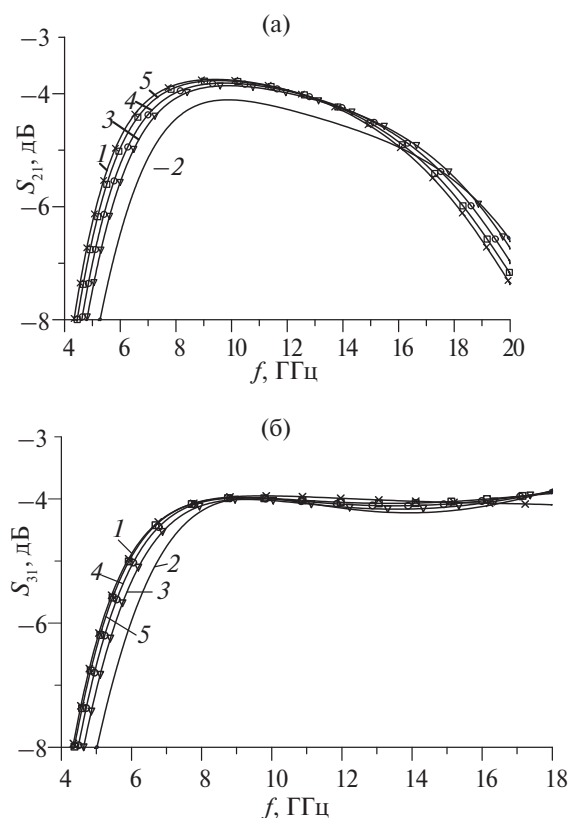


Рис. 5. Частотные характеристики параметров СТ S_{21} (а) и S_{31} (б): без ВСВ (1), со слоем ВСВ при $t = 5$ мкм (2), 25 мкм (3), 50 мкм (4), 100 мкм (5).

до 100 мкм S_{31} на этой же частоте почти не меняется, S_{21} уменьшается на 0.35 дБ. Это свидетельствует о том, что влияние ВСВ и экрана на потери в СТ не очень существенно.

В случае уменьшения t полоса СТ сдвигается вверх и при $t = 5$ мкм равна 7...17 ГГц. В диапазоне частот 8...12 ГГц без слоя ВСВ амплитудный и фазовый разбалансы СТ не превышают 0.2 дБ и 4.5°, а со слоем ВСВ 5 мкм и медным экраном — соответственно 0.3 дБ и 3.5°.

В целом можно заключить, что слой ВСВ с медным экраном не слишком сильно влияет на характеристики интегрального СТ на МПЛ. Это объясняется тем, что, несмотря на значительную зависимость волнового сопротивления и фазовой постоянной МПЛ от t , слой ВСВ и медный экран оказывают примерно одинаковое влияние на выполненные из отрезков МПЛ катушки индуктивности в синфазном и противофазном каналах СТ. Поэтому изменение амплитудного и фазового разбалансов СТ по сравнению с исходным состоянием (без слоя ВСВ) невелико.

Исследован также полосовой фильтр (ПФ) на отрезках МПЛ с боковой связью [7] (см. рис. 1г),

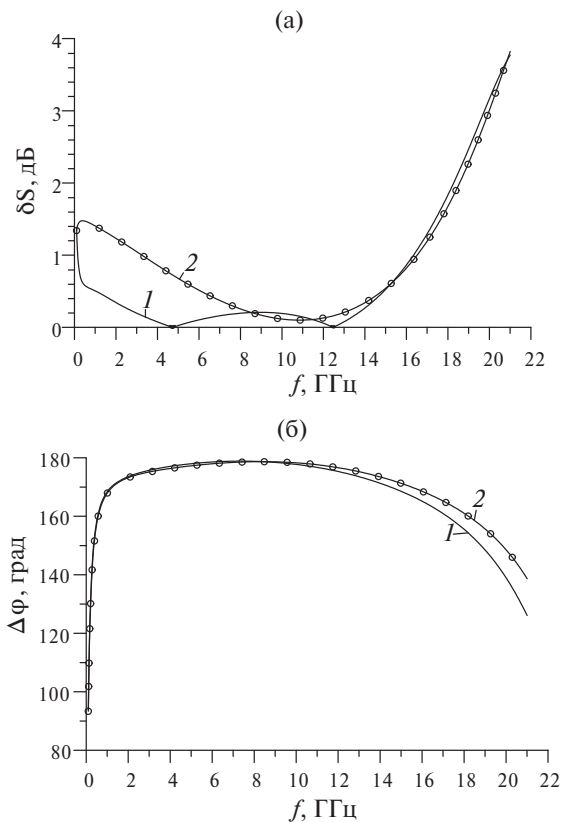


Рис. 6. Амплитудный разбаланс δS (а) и разность фаз $\Delta\phi$ (б) сигналов на выходе СТ: без ВСВ (1) и со слоем ВСВ при $t = 5$ мкм (2).

он выполнен в технологии GaAs МИС и рассчитан для полосы пропускания 6...12 ГГц. Рассчитанный коэффициент передачи фильтра показан на рис. 7.

Видно, что даже без слоя ВСВ и экрана потери в GaAs-подложке в определенной степени искажают

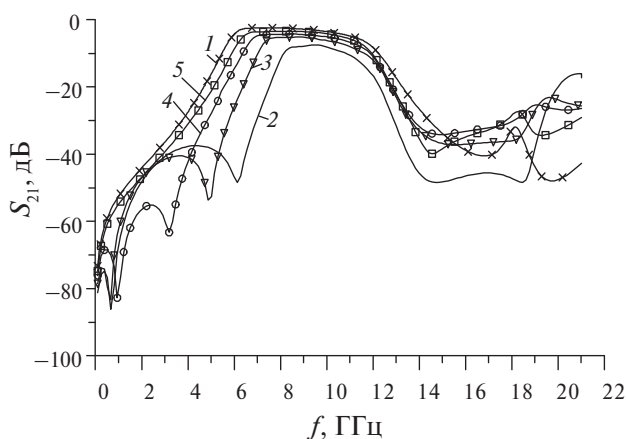


Рис. 7. Влияние слоя ВСВ и экрана на АЧХ полосового фильтра без ВСВ (1), со слоем ВСВ при $t = 5$ мкм (2), 25 мкм (3), 50 мкм (4), 100 мкм (5).

амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) ПФ. Однако наличие ВСВ и заземленного верхнего экрана оказывает дополнительное сильное влияние на АЧХ. Это обусловлено одновременным изменением волнового сопротивления, фазовой постоянной, потерь и коэффициента связи между отрезками МПЛ. В частности, при $t = 5$ мкм потери в фильтре на центральной частоте возрастают с 1.5 до 4 дБ, а полоса пропускания сужается с 6...12 до 8...11 ГГц. Это подтверждает возможность значительного изменения характеристик активных и пассивных устройств, реализуемых в МИС на МПЛ, при покрытии GaAs микросхем в 3D-модулях с помощью слоя ВСВ и металлизированного слоя.

Исследование также показало, что без металлического экрана покрытие GaAs МИС слоем ВСВ толщиной от 5 до 100 мкм гораздо слабее влияет на параметры МПЛ и КПЛ, а также пассивных СВЧ-устройств на их основе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам численного электромагнитного моделирования установлено, что диэлектрический слой ВСВ, нанесенный на поверхность GaAs МИС, оказывает значительное влияние на итоговые характеристики интегральных устройств, и этот эффект следует учитывать еще на этапе разработки принципиальной схемы и топологии. При этом копланарные устройства оказываются менее чувствительными к влиянию слоя ВСВ, чем устройства на основе МПЛ.

Также предложена простая полиномиальная модель для учета влияния толщины слоя ВСВ на волновое сопротивление МПЛ, позволяющая быстро провести предварительные оценки при разработке 3D-интегрированных модулей на основе GaAs МИС.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор FEWM-2023-0014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев С. // Электроника НТБ. 2018. № 7. С. 142.
2. *Nguen C.* Radio-frequency Integrated-circuit Engineering. New Jersey: John Wiley&Sons Inc., 2015.
3. Банков С.Е., Курушин А.А. Электродинамика для пользователей САПР СВЧ. М.: Солон-Экспресс, 2017.
4. *Svensson C., Dermer G.E.* // IEEE Trans. 2001. V. AP-24. № 2. P. 191.
5. *Djordjevic A.R., Biljic R.M., Likar-Smiljanic V.D., Sarkar T.K.* // IEEE Trans. 2001. V. EC-43. № 4. P. 662.
6. *Huang C.H., Chen C.H., Horng T.S.* // Proc. 2009 Asia Pacific Microwave Conf. Singapore. 7–10 Dec. N.Y.: IEEE, 2009. P. 1004.
7. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. М.: Связь, 1972.

EFFECT OF ADDITIONAL DIELECTRIC LAYER AND GROUNDED SHIELD ON RF CHARACTERISTICS OF GaAs MICROWAVE MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUIT ELEMENTS IN 3D-INTEGRATED MODULES

© 2025 F. I. Sheyerman^{a, *}, N. V. Goleneva^a, A. A. Kokolov^a, L. I. Babak^a,
M. V. Cherkashin^a, P. V. Panasenko^b, A. V. Volosov^b

^a*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Lenin Avenue, 40, Tomsk, 634050 Russian Federation*

^b*SC «MERI», Akademika Valieva Str., 6/1, Zelenograd, 124460 Russian Federation*

**E-mail: fish@tusur.ru*

Received September 14, 2023; revised February 6, 2024; accepted February 21, 2024

The effect of coating GaAs monolithic integrated circuit with a benzocyclobutene dielectric layer and grounded copper shield is investigated. Using electromagnetic simulation up to 40 GHz, changes of RF characteristics of microstrip and coplanar transmission lines, a Marshand balun, and a bandpass filter due to coating are demonstrated. It is shown that from the performance variation viewpoint, the application of lines is preferred in GaAs monolithic integrated circuits used in 3D-integrated modules with such the coating.

Keywords: monolithic integrated circuit, interposer, microstrip waveguide, coplanar waveguide, Balun — balanced-unbalanced, Integrated module, Benzocyclobutene