

Перспектива повышения выходной мощности в мощных СВЧ кремниевых биполярных транзисторах при использовании высокотемпературного фотополимера

Диковский В. И., Таран П. В.

Показаны преимущества применения фотополимера в технологии создания транзисторов. Фотополимер позволяет сформировать четырёхрядную конструкцию кристаллов. Это даст возможность отказаться от конструкции двухрядных транзисторов с предельно сложной технологией металлизации. При этом в корпусах зарубежных аналогов с $P_{\text{вых}} \geq 370$ Вт можно получить величину выходной мощности, превышающую более чем в 1,5 уровень зарубежных аналогов.

В [1] изложены первые результаты использования высокотемпературного отечественного фотополимера [2] при создании кремниевых биполярных мощных широкополосных СВЧ транзисторов. Однако полученные результаты не отражают предельных возможностей по улучшению их параметров. По значению выходной мощности, достигнутой в полосе частот 1,21-1,4 ГГц при $\tau_{\text{и}} = 300-330$ мкс и $Q = 10$, они заметно уступали лучшим американским транзисторам, имея отдаваемую мощность 200 Вт по сравнению с 370 Вт для аналогов. Это объясняется различием конструкции и технологии изготовления транзисторов.

Технология формирования металлизации, применяемая в зарубежных аналогах, достаточно сложна и, скорее всего, является предельной в использованной конструкции, так как с 2006 года максимальные результаты различных фирм не изменились.

Использование высокотемпературного фотополимера упрощает формирование металлизации.

Основная идея заключается в том, что с использованием высокотемпературного фотополимера можно создать транзисторные структуры с повышенной величиной тока раскачки, изготовив четырёхрядную транзисторную структуру вместо двухрядной. Это позволит увеличить выходную мощность. На рис. 1 представлен эскиз фрагмента четырёхрядной структуры.

В двухрядной структуре задача обеспечения симметричной работы двух рядов решена просто, в четырёхрядной структуре это значительно сложнее. Задача решена с помощью создания малоиндуктивных цепей объединения эмиттерных и базовых контактов в виде проводящих полосков, расположенных над первым и вторым уровнями металлизации на изолирующих слоях диэлектрика, создаваемого с использованием высокотемпературного фотополимера.

Существенным преимуществом органического диэлектрика, каковым является фотополимер, перед неорганическим является отсутствие растрескивания, что повышает процент выхода годных приборов и их надёжность.

Малая толщина разделительного диэлектрика позволяет получить цепи объединения контактов в четырёхрядной структуре достаточно малоиндуктивными по сравнению с внутрискруктурными проволочными индуктивностями. Это позволяет формировать внешние проволочные элементы $L_{\text{э}}$ и $L_{\text{б.вх}}$, контактируя их в первом контактном ряду, то есть между первым и вторым рядами транзисторных структур, а элементы $L_{\text{б.вых}}$ – во втором контактном ряду, то есть между третьим и четвертым рядами транзисторных структур, как это видно на рис. 1. Поскольку высокотемпературный фотополимер

с успехом был использован при создании транзистора с двухрядной структурой при длине эмиттерных областей ≈ 80 мкм, такая длина рядов была принята и при формировании четырёхрядной структуры транзистора. При этом каждая пара рядов транзисторов формируется известным способом с использованием первого уровня высокотемпературного фотополимера для разделения первого и второго уровней металлизации при толщине фотополимера $\approx 2,7-3,0$ мкм ($\epsilon \approx 3,5$). Соединение металлизации первого и второго уровней реализуется через узкие окна, сформированные в указанном фотополимере.

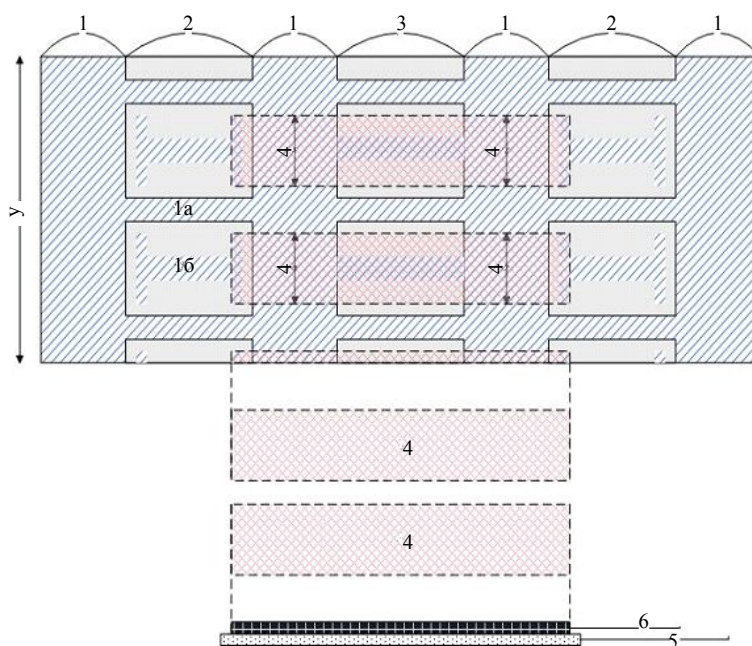


Рис. 1

Эскиз фрагмента транзисторных рядов по эмиттеру и базе в транзисторном кристалле с 7-ю эмиттерными электродами:

- y – направление вдоль рядов; 1 – второй уровень металлизации; 1а – эмиттерный контакт; 1б – базовый контакт; 2 – первый и второй контактные ряды; 3 – область объединения по эмиттеру двух пар рядов;
- 4 – область объединения по базе (вид сверху); 5 – второй уровень диэлектрической изоляции (сечение);
- 6 – третий уровень металлизации (объединение по базе)

Проблема создания четырёхрядной структуры решается следующим способом: в кристалле металлизация в каждой паре транзисторных рядов объединяется в контактный ряд, расположенном между ними, эмиттерными и базовыми полосками заданной ширины. Объединение двух пар транзисторных рядов по эмиттеру осуществляется соосно с эмиттерными и базовыми полосками, соединяя области эмиттера второго и третьего транзисторных рядов (рис. 1).

Суммарная длина объединения полосков от контактов первого контактного ряда до второго не превышает 400 мкм. Индуктивность объединения полосков при этом не превышает 0,004 нГ, что является достаточным для достижения равномерного токораспределения.

Для объединения базовых контактов в четырёхрядной структуре требуется сформировать второй уровень разделительного высокотемпературного диэлектрика для изоляции между эмиттерными и базовыми электродами.

Объединяющую металлизацию по $L_{\sigma_{вх}}$ и $L_{\sigma_{вых}}$, то есть третий уровень металлизации, следует расположить на втором уровне разделительного диэлектрика, выполненного в

виде фотополимера толщиной 1,5-1,7 мкм. Эта толщина достаточна, поскольку ёмкость изоляции играет меньшую роль в сравнении с первым уровнем изоляции.

Чтобы снизить индуктивность полосковых соединений по базе, следует сформировать соединительные полоски шириной 200 мкм (рис. 1) в соответствии с длиной p^+ областей на краях второго и третьего транзисторных рядов.

Для повышения эффективности рассеяния тепла в четырёхрядной конструкции транзисторного кристалла необходимо увеличить расстояние между рядами транзисторных структур.

Рассмотрим возможность использования корпусов с шириной фланца 10 мм и шириной коллекторной контактной площадки 2 мм. В них зона сборки коллекторных выводов занимает 0,5 мм, а зона монтажа транзисторного кристалла и электрода параллельного контура равна 1,5 мм. Оставляя под сборку электрода параллельного контура также 0,5 мм, получим размер монтажа транзисторного кристалла 1,0 мм.

Четыре ряда эмиттеров по 80 мкм займут ширину 320 мкм. При восьми границах тепловыделения области между соседними границами тепловыделения имеют ширину по 170 мкм. Дальнейшее расширение области между границами тепловыделения, как показывает расчёт, практически не изменяет величины R_T , но увеличивает индуктивность объединения полосков.

В двух контактных рядах базовые электроды второго уровня металлизации маскируются, занимая по 15 мкм с каждой стороны контактного ряда. В итоге открытой для сборки оказывается контактная область шириной 140 мкм каждого контактного ряда.

Расчёт теплового сопротивления проведён для корпусов с единичными посадочными размерами, длина коллекторной посадочной площадки равна 12 мм. При этом двухрядный вариант конструкции (американский аналог) размещён на трёх кристаллах, а четырёхрядный вариант, описанный в настоящей работе, размещён на шести кристаллах, расположенных на контактной площадке с расстоянием между тепловыделяющими краями пары кристаллов порядка 110 мкм.

В итоге расчётное тепловое сопротивление аналога при $\tau_{и} = 300-330$ мкс и $Q = 10$ составило 0,265 град/Вт, что согласуется с данными фирмы-изготовителя.

Для спроектированного четырёхрядного транзистора расчётное значение теплового сопротивления в том же режиме составило 0,165 град/Вт.

С учётом соотношения эффективной длины периметра эмиттеров и соотношения тепловых сопротивлений расчётное значение импульсной выходной мощности у четырёхрядного транзистора должно составить 580 Вт. У аналога с двухрядной структурой, реализующей современные предельные возможности, оно составляет 370 Вт. Именно в этом состоит главный результат настоящей работы.

Разница в расчётных значениях теплового сопротивления трёхкристального и шестикристального вариантов конструкции составила 2%, что можно считать несущественным при сравнении четырёхрядной конструкции с американским аналогом.

Важным фактором надёжной работы мощных СВЧ транзисторов является степень подавления поперечной неустойчивости в структуре транзистора. Впервые объяснение подобных эффектов и главные причины и условия их возникновения описаны в [3]. Исследование многообразных проявлений поперечной неустойчивости представлено в [4].

В описанном варианте четырёхрядной конструкции и в американском аналоге использованы два общих способа подавления поперечной неустойчивости, связанные с

введением параллельного распределённого контура в выходной цепи и малоиндуктивного объединения эмиттерных цепей отдельных кристаллов. Однако с учётом полученного превышения выходной мощности отечественного четырёхрядного транзистора и неизбежного в связи с этим превышения ёмкости коллектора над соответствующими параметрами аналога был применён дополнительно третий, отличный от аналога, способ подавления поперечной неустойчивости, который, на наш взгляд и по данным [4], является наиболее эффективным при использовании транзистора в широкой полосе рабочих частот. Этот способ запатентован [5] и сводится к введению резистора в поперечную цепь, объединяющую коллекторы всех транзисторных кристаллов. Именно здесь формируется поперечный резонанс распределённой линии, образованной ёмкостью коллектора кристаллов, участвующих в сложении мощности, и индуктивностью коллекторной контактной площадки.

Величина сопротивления R_k может быть оценена по следующей формуле:

$$R_k = \omega_b \cdot L_k,$$

где R_k – величина сопротивления, гасящая паразитные колебания; ω_b – верхняя граница рабочей полосы частот; L_k – поперечная индуктивность коллекторной контактной площадки.

Существенной особенностью четырёхрядной транзисторной структуры является необходимость обеспечения работы всех 4-х транзисторных рядов с одинаковой плотностью тока. Наибольшая плотность тока эмиттера I_3 при объединении 4-х транзисторных рядов будет на границе первого контактного ряда со вторым транзисторным рядом. При ширине эмиттерной контактной площадки равной 40 мкм плотность тока на её границе со вторым транзисторным рядом возрастает в 3 раза. Чтобы исключить перегрев в этом месте, надо в 3 раза снизить сопротивление золотого слоя Ti-Pt-Au металлизации. Для этого необходимо увеличить ширину эмиттерных контактных площадок в 1,5 раза, а толщину Au довести до 2 мкм.

При протекании $I_{бвх}$ и $I_{бвых}$ ток базы, обеспечивающий три транзисторных ряда, не должен создавать перегрева, то есть базовые контактные площадки должны быть также расширены до 60 мкм, при этом зазоры в контактных рядах между контактами будут не менее 80 мкм.

Эмиттерные области второго и третьего транзисторных рядов можно объединить полосками, соосными с эмиттерными и базовыми площадками шириной 40 мкм.

В заключение следует отметить, что конструирование мощного СВЧ транзистора на основе многоуровневой металлизации с использованием нового отечественного высокотемпературного фотополимера даёт повышение выходной мощности транзистора более чем в 1,5 раза по отношению к американскому аналогу, в котором реализованы наивысшие технологические возможности формирования двухрядной транзисторной структуры. Параметры отечественного фотополимера существенно выше импортных аналогов. Использование его представляется очень перспективным при создании СВЧ транзисторов других классов, а также СВЧ интегральных схем, требующих сочетания высокой мощности и высокого уровня интеграции.

Литература

1. Диковский В. И. Высокотемпературный фотополимер в технологии изготовления мощных СВЧ транзисторов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – Вып. 1(228). – С. 95-96.
2. Патент РФ № 2379731 от 20.01.2010 г. Рудая Л. И., Шаманин В. В., Лебедева Г. К., Климова Н. В., Большаков М. Н.
3. Диковский В. И., Евстигнеев А. С. Повышение выходной мощности генераторных СВЧ транзисторов, предназначенных для работы в широком диапазоне частот // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. XXII. – № 12. – С. 2408-2414.
4. Аронов В. Л. Анализ явлений поперечной неустойчивости в мощных СВЧ транзисторах // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2007. Вып. 2. – С. 65-75.
5. Патент №1153767 класс HOI L 29/70 от 03.03.1993 г. Диковский В. И., Евстигнеев А. С.