

Монолитные интегральные схемы СВЧ: взгляд изнутри

Роман АЛЕКСАНДРОВ
roman@finestreet.ru

Созданию МИС СВЧ способствовало множество достижений в интегральной технологии XX века, однако с определенной долей достоверности можно сказать, что прототипом современной МИС СВЧ была идея, озвученная и запатентованная (патент США № 2981877) в 1961 году Робертом Нойсом, работавшим в то время в компании Fairchild. Он создал микросхему с планарной структурой, в качестве подложки используя кремний. Планарные диффузионные биполярные кремниевые транзисторы и резисторы Нойс соединял между собой тонкими алюминиевыми полосками, лежащими на пассивирующем оксиде кремния. Для изготовления этих полосок был использован традиционный процесс, включающий напыление металлического слоя и фотолитографию с последующим химическим травлением металла. Позже сверхвысокочастотные МИС стали изготавливать на основе полупроводниковых кристаллов из арсенида галлия, который и по сей день занимает лидирующие позиции как материал для производства МИС СВЧ (более 80% монолитных микросхем выполняются на подложках из арсенида галлия и тройных полупроводников на его основе: AlGaAs и InGaAs). Достоинствами арсенида галлия являются высокая подвижность электронов, широкая запрещенная зона, весьма широкий диапазон рабочих температур, достаточно удобная возможность получения полуизолирующего GaAs¹, хорошие оптические характеристики, низкая потребляемая мощность. Благодаря высокой подвижности электронов МИС СВЧ на арсениде галлия могут быть использованы в диапазоне от 1 ГГц до 100 ГГц. Исторически первыми применениями таких МИС были военные и гражданские РЛС, спутниковые системы связи и навигации, средства связи и т. п. Пожалуй, с некоторой долей уверенности можно утверждать, что если на этапе становления

В последнее время монолитные интегральные схемы (далее по тексту МИС СВЧ, в англоязычной литературе MMIC — Monolithic Microwave Integrated Circuit) получили широкое распространение не только в военной, но и в гражданской технике, особенно в сотовой телефонии. Основными причинами являются бурное развитие высокоскоростных широкополосных систем передачи данных при постоянной потребности снижения массогабаритных параметров изделий.

монолитных интегральных схем двигателем их дальнейшего развития была необходимость повышения надежности устройств (военная техника), то сейчас, в основном, этой движущей силой являются постоянно растущие требования рынка по снижению габаритов изделий (в частности, сотовых телефонов, средств навигации и т. п.), однако и надежность тоже не на последнем месте.

Монолитные ИС чаще всего используются в СВЧ-диапазоне в приложениях, где необходимы небольшие размеры и высокая надежность. Примерами систем на базе МИС могут служить приемники и передатчики систем связи, фазированные антенные решетки (ФАР), датчики, работающие на сверхвысоких частотах и т. п. В последнее время МИС широко используются в сотовой и спутниковой телефонии, устройствах глобального позиционирования GPS. Успехи в технологии МИС стали широко использоваться и в производстве дискретных компонентов, что более всего относится к биполярным гетеротранзисторам, выполняемым по технологии

МИС. Эти транзисторы уже давно пользуются большим спросом у производителей профессиональных средств связи.

Характерным признаком монолитных ИС является их низкая степень интеграции в сравнении с цифровыми микросхемами. Монолитная ИС обычно представляет собой функционально законченное устройство, не требующее использования каких-либо внешних задающих и подстроечных элементов. Примеры конструкций монолитных микросхем СВЧ приведены на рис. 1.

Наиболее типичными МИС являются малошумящие усилители, смесители, усилители мощности, модуляторы и т. д. Из вышесказанного отчетливо видно, что на основе перечисленных МИС легко построить устройство более высокого уровня, например, приемник. При этом, поскольку приемник будет содержать порядка единиц составных элементов (МИС не требуют внешних компонентов), и в связи с тем, что МИС имеет довольно высокую наработку на отказ, надежность такого приемника будет весьма высокой, недости-

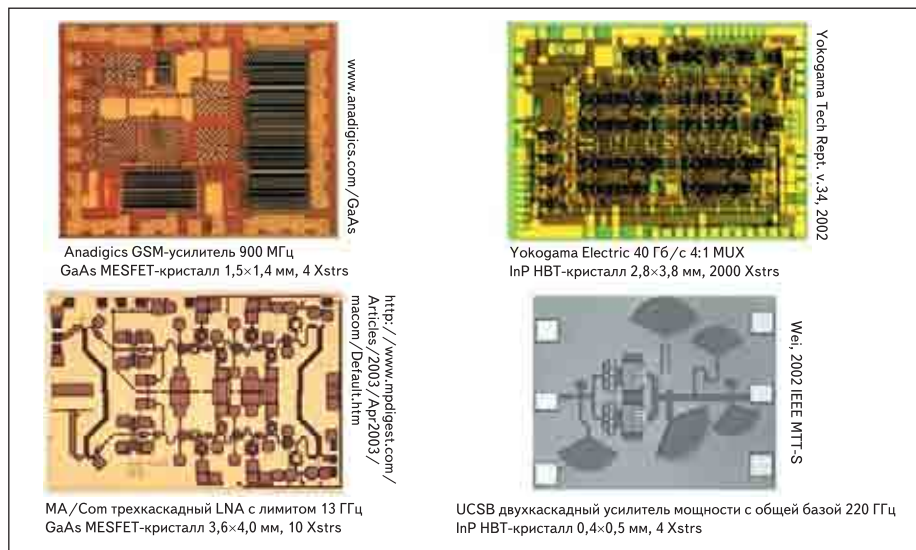


Рис. 1. Примеры МИС СВЧ

¹ Конечно, не настолько удобная, как получение изолирующего оксида кремния простым окислением.

жимой при его реализации с аналогичными техническими характеристиками, но на дискретных компонентах. Существуют также и устройства, целиком реализованные в виде одной МИС. Ярким примером может служить МИС-приемник, выполненный на едином кристалле. Очевидно, что область применения микросхем такого типа сильно ограничена, особенно если принять во внимание то, что МИС представляет собой законченное устройство, не требующее каких-либо внешних подстроечных компонентов, и что такой приемник невозможно будет адаптировать к использованию, например, в другом частотном диапазоне. С другой стороны, если предусмотреть внешние элементы подстройки, то теряются преимущества от использования МИС. Конечно, о массовости таких микросхем не может идти и речи, и единственными областями применения таких МИС являются космическая и военная техника, где на первом плане стоит надежность прибора, а не его цена. В связи с единичным типом производства микросхем такого типа здесь не представляется возможным воспользоваться хорошо отработанной методикой статистического прогнозирования средней наработки на отказ и встает другая проблема, связанная с прогнозированием индивидуальной надежности микросхемы.

В период с 1999 по 2004 год объем продаж монолитных ИС увеличился практически вдвое. Кроме того, заметна тенденция увеличения доли продаж МИС в коммерческой, а не военной области. Пожалуй, основной причиной этого служит интенсивно развивающийся рынок беспроводных систем связи и передачи данных. В связи с этим большинство производителей полупроводниковых пластин (Vitesse, Kopin, TriQuint, Conexant, M/A-COM, RF Micro Devices, ATMI, Motorola) существенно расширили объемы производства пластин из арсенида галлия диаметром 150 мм.

Материалы МИС СВЧ

В процессе эволюции технологии производства МИС прогрессировала и их конструкция. Примерно в то время, когда появился биполярный транзистор с гетеропереходом, выполненный по технологии МИС, возник интерес к использованию и других материалов для производства монолитных микросхем. Этот интерес в первую очередь был вызван необходимостью реализации микросхем, работающих на более высоких частотах. В качестве таких материалов было предложено использовать полупроводниковые соединения вида АЗВ5. Для базы и коллектора было использовано тройное соединение InGaAs, а эмиттер и коллектор выполняли на фосфиде индия InP. Использование фосфида индия InP позволило улучшить частотные характеристики и увеличить пробивное напряжение коллектора. Поскольку ширина запрещенной зоны InP больше, чем у In_{0,53}Ga_{0,47}As (1,35 эВ и 0,75 эВ соответ-

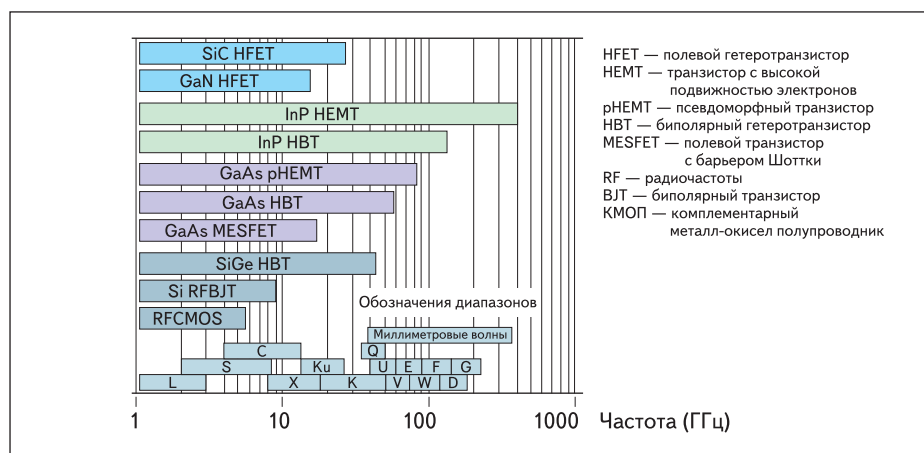


Рис. 2. Диаграмма использования компонентов МИС по рабочим частотам

ственно), то напряжение пробоя коллекторного гетероперехода составляет не менее 6 В. На данный момент существует большое разнообразие комбинаций материалов эмиттера, базы и коллектора, и тема выбора материала МИС с точки зрения поиска оптимума в конструкции и в технологии изготовления заслуживает рассмотрения в отдельной статье, поэтому отметим лишь, что наибольшее распространение получили p-n-p транзисторные гетероструктуры типа InAlAs-InGaAs-InP и InP-InGaAs-InP. Использование таких материалов вкупе со снижением толщины базы, которое стало возможным благодаря интенсивному развитию технологии молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяет добиться работы транзистора на граничной частоте до 250 ГГц!

Другим популярным материалом для изготовления МИС СВЧ служит нитрид галлия. СВЧ-приборы на основе нитрида галлия позволяют добиться больших значений удельной плотности выходной мощности. Например, компанией Cree был разработан GaN полевой транзистор с барьером Шоттки с затвором длиной 0,55 мкм и шириной 0,25 мкм, выходная мощность которого в непрерывном режиме на частоте 4 ГГц составляла 8 Вт. Соответственно, удельная выходная мощность такого транзистора равна 33 Вт/мм. При том, что рабочее напряжение «исток-сток» составляло 120 В, максимальная плотность тока в канале достигала 1,2 А/мм.

Активные элементы МИС и их надежность

Основным активным элементом МИС с момента их появления и до настоящего времени является полевой транзистор с барьером Шоттки (MESFET). Однако все возрастающие требования приводят к невозможности их использования в некоторых приложениях. Это связано со сложностью повышения быстродействия MESFET посредством уменьшения длины затвора. Поэтому в последнее время получили распространение транзисторы с повышенной подвижностью электронов и псевдоморфные (HEMT/PHEMT), а также биполярные гетеротранзисторы (HBT). Диаграмма, показывающая частоты, при которых могут использоваться соответствующие приборы, показана на рис. 2.

Рассмотрим подробнее перечисленные активные элементы МИС СВЧ.

Полевые транзисторы с барьером Шоттки (MESFET)

Первый арсенидгаллиевый полевой транзистор с барьером Шоттки появился в 1963 году. Это стало возможным благодаря разработанному фирмой GEC Marconi Material Technology процессу контролируемого выращивания высокочистых тонких пленок на полупроводниковом арсениде галлия.

Конструкция MESFET

Базовая структура MESFET приведена на рис. 3.

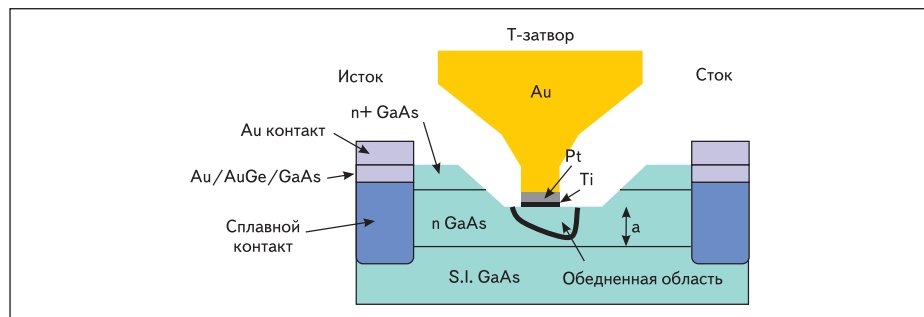


Рис. 3. Базовая структура полевого транзистора с барьером Шоттки

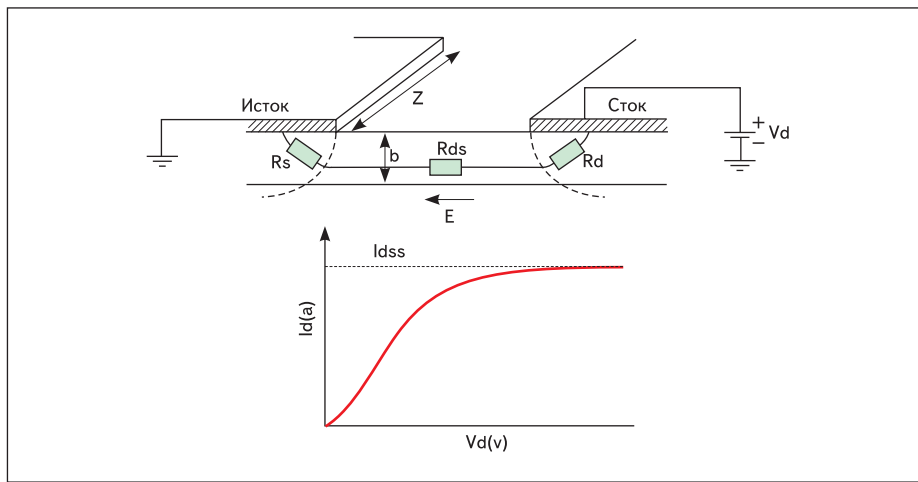


Рис. 4. Эквивалентная схема и типовая ВАХ MESFET

Базовым материалом является подложка из арсенида галлия. Буферный слой эпитаксиально выращивается на полуизолирующей подложке и служит для изоляции дефектов в подложке от рабочей части транзистора. Канал является тонким, слегка легированным проводящим слоем полупроводникового материала, эпитаксиально выращенным на буферном слое. Высоколегированные области, показанные на схеме, необходимы для обеспечения низкого омического сопротивления контактов транзистора.

Эквивалентная схема и типовая вольт-амперная характеристика полевого транзистора с барьером Шоттки приведена на рис. 4.

Напряжение отсечки такого транзистора можно определить по следующей формуле:

$$V_p = \left(\frac{q \times N_d}{2 \times \epsilon_0 \times \epsilon_r} \right) \times a^2,$$

где q — заряд электрона; N_d — концентрация донорной примеси; ϵ_0 , ϵ_r — электрическая проницаемость; a — глубина канала.

Ток стока подчиняется следующей зависимости:

$$I_D = Q(x) \times v(x) = Z \times b(x) \times q \times n(x) \times v(x),$$

где $v(x)$ — скорость электронов; Z — ширина канала; $b(x)$ — эффективная глубина канала; q — заряд электрона; $n(x)$ — концентрация электронов.

Как было сказано выше, под затвором формируется обедненная область. Тем самым снижается эффективная глубина канала $b(x)$ и, соответственно, увеличивается сопротивление проходящему под затвором току. Глубина обедненной области зависит от падения напряжения на барьере Шоттки. Поскольку ток через канал равен току через распределенный резистор, между стоком и истоком возникает повышенное падение напряжения, что приводит к увеличению обедненной области в канале на стороне стока. Неоднород-

ность этой глубины имеет два последствия для работы устройства.

Во-первых, происходит накопление электронов на стороне истока и обеднение электронами области со стороны стока. Этот заряженный диполь создает емкостную обратную связь между стоком и каналом (в англоязычной литературе эта емкость обычно обозначается как CDC). Во-вторых, возникает электрическое поле, приводящее к снижению напряжения насыщения транзистора. Глубина обедненной области и, соответственно, сопротивление току между истоком и стоком, а также ток насыщения могут изменяться приложением смещения к затвору. Если это отрицательное смещение достаточно велико, глубина обедненной области будет равна глубине канала. Таким образом, транзистор может работать как управляемый напряжением резистор или переключатель. Последнее часто используется в высокоскоростных цифровых блоках микросхем. В МИС же в основном используется свойство MESFET усиливать мощность.

Оценим максимальную рабочую частоту такого транзистора. Она определяется временем пролета электронов через канал и может быть вычислена следующим образом:

$$f_t = \frac{1}{2 \times \pi \times \tau} = \frac{V_{sat}}{2 \times \pi \times L},$$

где V_{sat} — напряжение насыщения; τ — время пролета электронов через канал; L — длина канала.

Типовое значение $V_{sat} \approx 6 \times 10^{10}$ мкм/с для арсенида галлия с типовым уровнем легирования, обычно используемым в канале. Отсюда легко получить, что для обеспечения частоты более 10 ГГц длина затвора должна быть меньше 1 мкм. Максимальная рабочая частота может быть аппроксимирована следующим образом:

$$f_{max} = \frac{f_t}{2} \times \sqrt{\frac{R_{DS}}{R_G}},$$

где R_{DS} — сопротивление между стоком и истоком; R_G — сопротивление затвора.

Очевидно, что для обеспечения высокого быстродействия транзистора необходимо стремиться к минимизации длины затвора, что, однако, ограничивается технологическими возможностями производства. Кроме сказанного, необходимо помнить, что для эффективного управления током канала длина канала L должна быть больше его глубины a , то есть $L/a > 1$. Поэтому в большинстве MESFET глубина канала составляет 0,05–0,3 мкм. Сказанное означает, что для обеспечения достаточно большого тока концентрация носителей в канале должна быть весьма велика.

Малые размеры транзисторов приводят к снижению их надежности. Это связано с малым поперечным сечением области затвора, что приводит к увеличению плотности тока. Это является обычным для мощных транзисторов, в которых основным механизмом отказа является миграция электронов. Для уменьшения сопротивления затвора обычно используется золото. Поскольку золото создает «ловушки» в арсениде галлия, которые эффективно снижают концентрацию носителя и, соответственно, ток через транзистор, должен быть использован барьерный металл, например, платина. В связи с тем, что глубина канала очень мала, любая диффузия металла затвора в арсенид галлия приводит к значительным изменениям тока, протекающего через канал, и уменьшает напряжение отсечки транзистора. Малые расстояния между затвором и стоком создают сильные электрические поля, которые могут привести к лавинной генерации электронов. Эти «горячие» электроны могут затем становиться «ловушкой» на поверхности GaAs или в пассивирующем материале, который обычно размещен на поверхности транзистора. Факторы ненадежности полевых транзисторов в большей степени принадлежат к классу технологических. В устройствах малого сигнала деградация омических контактов или взаимная диффузия металла затвора и арсенида галлия приводят к сдвигу I_D , g_m и V_p .

Хотя мощные MESFET тоже страдают от параметрической деградации, все же наиболее распространенными являются катастрофические (внезапные) отказы. Однако, успехи в технологии производства GaAs-приборов и обеспечение работы в пределах безопасных режимов уменьшают число отказов. Для усилителей мощности полевые транзисторы должны быть разработаны для максимальной пиковой выходной мощности. Это означает большое напряжение «сток-исток» и значительный ток стока. К сожалению, одновременно оба этих параметра не могут быть максимизированы. Поэтому на данный момент для МИС СВЧ-усилителей мощности используются биполярные гетеротранзисторы. Для увеличения тока стока требуется высокая концентрация носителей или большая ширина затвора.

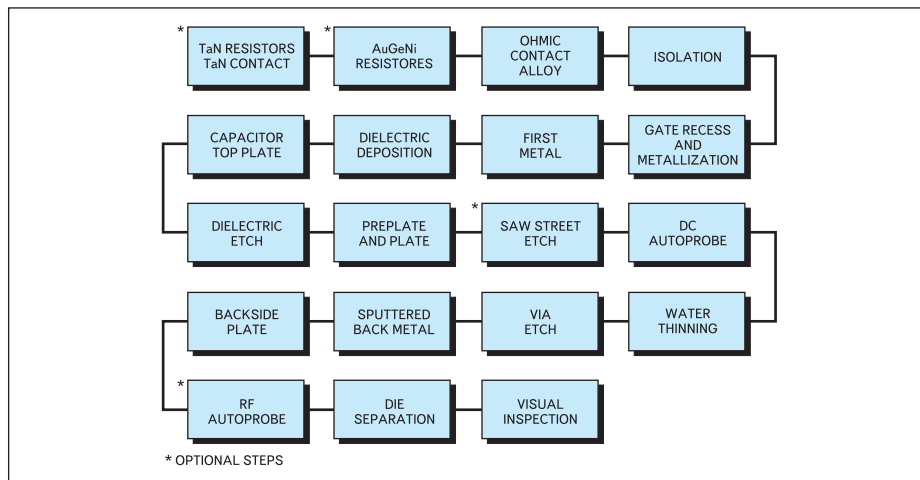


Рис. 5. Типовой техпроцесс изготовления MESFET

Однако, не стоит забывать, что глубина канала не может быть увеличена, поскольку это приводит к уменьшению частотного диапазона работы устройства. Концентрация носителей не может быть увеличена без снижения напряжения пробоя «затвор–сток», которое необходимо максимизировать для увеличения допустимого напряжения «сток–исток». Следовательно, альтернатива одна: увеличивать ширину затвора. Однако в конструкции СВЧ-устройств линейные элементы большой длины не являются элементами с однородным потенциалом на протяжении всей длины. Основное правило заключается в том, что линия должна быть меньше десятой части длины волны, тогда ее можно рассматривать как однородный элемент. Для арсенида галлия это соотношение выглядит следующим образом:

$$Z \leq \frac{11,3}{f} \text{ мм,}$$

где f — частота, ГГц.

Отсюда видно, что в X-диапазоне (8–12 ГГц) максимальная длина затвора, которая может быть использована, не превышает 1 мм. Если требуется более высокий ток, может быть использовано параллельное включение нескольких затворов. Однако плотное расположение параллельно включенных затворов приводит к увеличению локальной температуры соответствующей области МИС.

В связи с тем, что арсенид галлия — плохой проводник температуры, это снижает надежность MESFET.

Технология изготовления MESFET

Типовой техпроцесс изготовления MESFET методом ионной имплантации приведен на рис. 5.

Первым шагом традиционно является изготовление тонкопленочных резисторов. Металл резистора (AuGeNi) испаряется, затем наносится TaN. AuGeNi обычно используется для изготовления низкоомных резисторов, в то время как TaN — для высокоомных.

Базовые этапы технологии приведены на рис. 6.

Вторым этапом является изолирование и формирование затвора. За счет ионной имплантации, например, бора, осуществляется деактивация проводящего слоя GaAs и формируются необходимые изолирующие области. После этого этапа осуществляют нанесение металла и формирование воздушных «мостиков». В заключение формируют переходные отверстия и осуществляют обработку обратной стороны подложки.

Транзисторы с высокой подвижностью электронов и псевдоморфные транзисторы (HEMT/PHEMT)

Как говорилось выше, в последнее время в ответственных приложениях, там, где требуются малый коэффициент шума и высо-

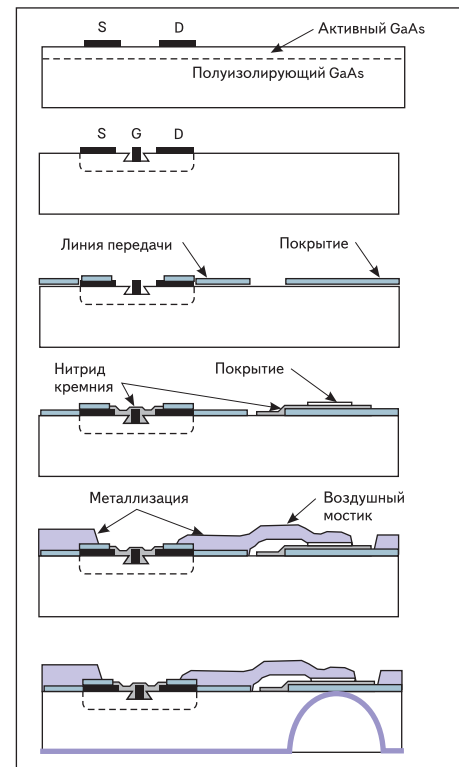


Рис. 6. Схемы базовых этапов изготовления MESFET

кое усиление, транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) и псевдоморфные (PHEMT) транзисторы получают все большее распространение.

Оба этих транзистора относятся к классу полевых транзисторов, поэтому базовые принципы функционирования весьма схожи. Основным отличием между транзисторами с высокой подвижностью электронов и полевыми транзисторами является эпитаксиальная структура слоя.

Конструкция HEMT/PHEMT

Эпитаксиальная структура базового транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT) приведена на рис. 7а, псевдоморфного транзистора — на рис. 7б.

Аналогично с полевыми транзисторами с барьером Шоттки (MESFET), структура выращена на полуизолирующей подложке из GaAs при помощи молекулярно-лучевой эпитаксии (в англоязычной литературе Molecular Beam

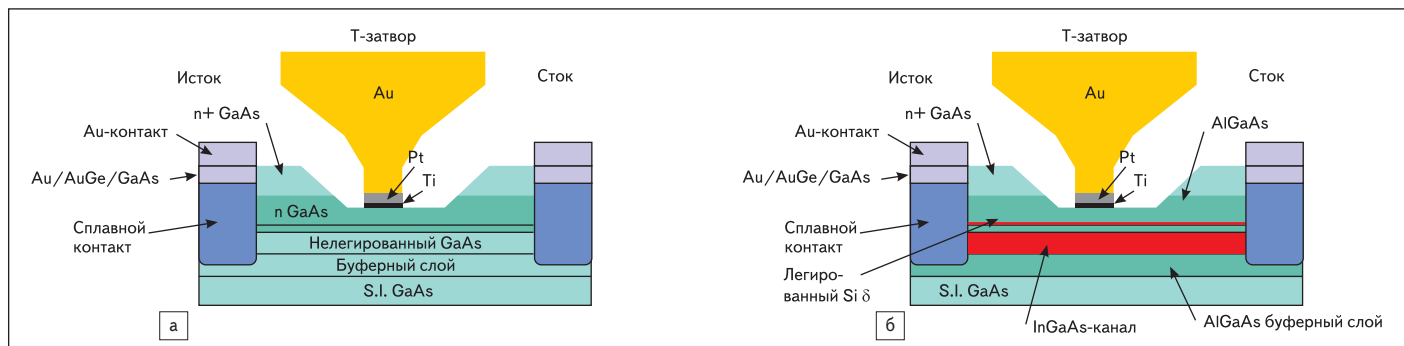


Рис. 7. Базовая структура транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT) (а) и псевдоморфного транзистора (б)

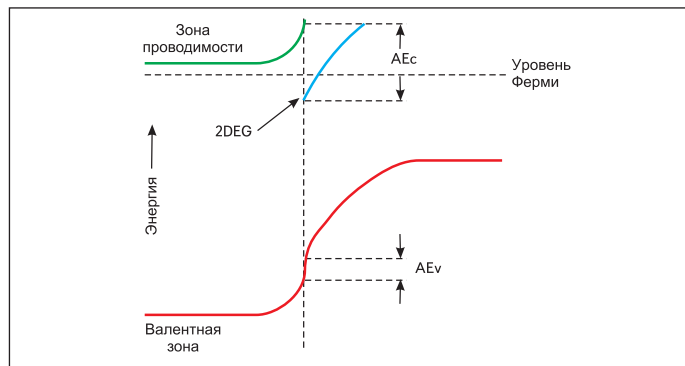


Рис. 8. Энергетические диаграммы HEMT

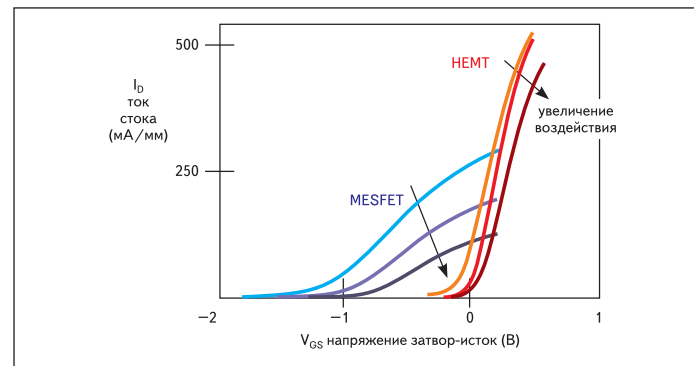


Рис. 9. Влияние эффекта «погружения» затвора на ВАХ MESFET и HEMT транзисторов

Эпитакси — MBE) или более распространенного металлоорганического испарения.

Буферный слой, обычно тоже арсенидгаллиевый, эпитаксиально выращивается на подложке, служит для изоляции дефектов и призван создать гладкую поверхность, на которой происходит выращивание активных слоев транзистора.

Канал, соответствующий стандартной структуре транзистора, показан ниже. В идеальной системе все электроны проводимости размещаются в этом канале. Наиболее важным в слое канала является двумерный электронный газ (2DEG на рис. 8), являющийся следствием различной ширины интервалов.

На надежность транзисторов HEMT и PHEMT влияют параметры эпитаксиальной структуры, процесс производства и геометрия устройства. Основными механизмами отказа являются:

- «Погружение» затвора вследствие взаимной диффузии металла затвора в полупроводник и снижение усиления;
- Деградация омических контактов «сток–исток» вследствие деградации сплавной области, а также увеличение сопротивления «сток–исток» R_{DS} ;
- Повреждение поверхности под действием «горячих» электронов;
- Чувствительность к кислороду воздуха приводит к возникновению поверхностных реакций, в результате возникают так называемые «ловушки»;
- Водородное отравление приводит к снижению усиления и напряжению отсечки;
- Высокая влажность может быть причиной короткого замыкания затвора и стока.

Наглядное представление влияния эффекта «погружения» затвора на вольт-амперные характеристики MESFET и HEMT транзисторов приведено на рис. 9. Стрелками показано направление смещения характеристики. Как видно из рисунка, такое сильное смещение ВАХ может привести не только к выходу характеристик устройства за пределы допуска, но и в некоторых случаях к отказу активного элемента (MESFET, HEMT и др.).

Технология изготовления HEMT/PHEMT

Первым этапом процесса является тщательный отбор подложек с требуемыми характе-

ристиками. Между технологиями изготовления HEMT и PHEMT имеются, несомненно, незначительные различия, однако в данном случае мы их рассматривать не будем, коснувшись лишь базового процесса, который для обоих приборов является одинаковым.

Типичная последовательность изготовления приведена на рис. 10.

Первым этапом является формирование активного канала и имплантация изолятора, после чего формируются омические переходы, затем осуществляется формирование углублений затвора, затем — области «затвор–металл».

После этого производят травление истока и контактов, формируют воздушные мостики, переходные отверстия и осуществляют обработку обратной стороны подложки.

Биполярные гетеротранзисторы (HBT)

Биполярные гетеротранзисторы широко используются как в цифровых, так и в аналоговых МИС на рабочих частотах выше диапазона Кв. За счет своей структуры они обеспечивают более быстрое переключение, в основном за счет уменьшенного сопротивления базы и чрезвычайно малой емкости между коллектором и подложкой. Цена таких транзисторов относительно невысока, что связано

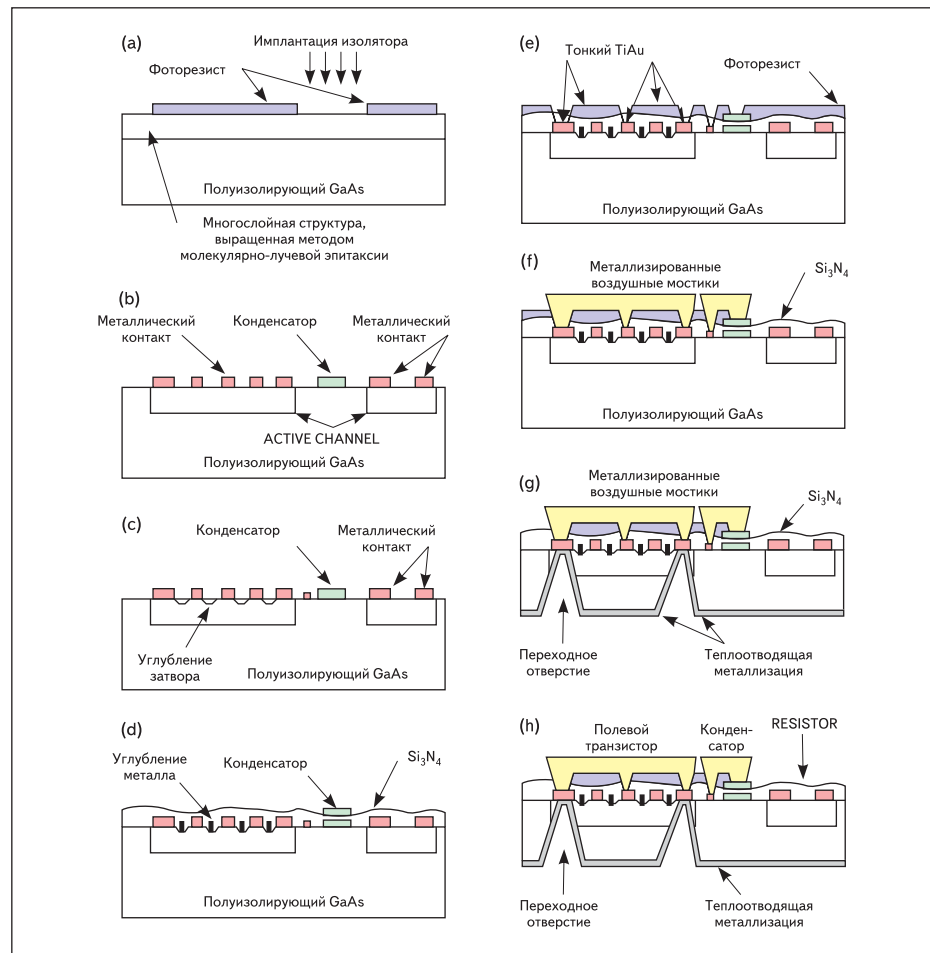


Рис. 10. Типовая последовательность изготовления HEMT

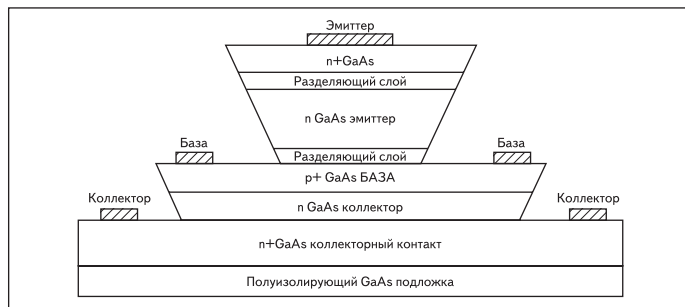


Рис. 11. Базовая структура биполярного гетеротранзистора

с меньшей требовательностью технологического процесса в сравнении, например, с полевыми транзисторами. Кроме высоко-го быстродействия, биполярные гетеротранзисторы обеспечивают более высокое по сравнению с FET предельно допустимое напряжение. Эти транзисторы обладают хорошей линейностью, низкими фазовыми шумами, они легко согласуются.

Конструкция НВТ

Как видно из рис. 11, структура биполярного гетеротранзистора — вертикальная.

Подложкой в данном случае служит полупроводниковая пластина арсенида галлия. Эпитаксиальные слои могут быть выращены различными способами, например, молекулярно-лучевой эпитаксией (Molecular Beam Epitaxy).

Типовые вольт-амперные характеристики биполярного гетеротранзистора приведены на рис. 12.

Принцип работы биполярного гетеротранзистора

В отличие от рассмотренных выше активных приборов МИС СВЧ, биполярные гетеротранзисторы имеют вертикальную структуру. Благодаря своей конструкции они не только более высокочастотны, чем, например, MESFET, но и удобны для использования в усилителях мощности. Рассмотрим принцип функционирования НВТ и попробуем понять, почему это стало возможным (рис. 13).

Как видно из рисунка, потенциальный барьер инжектированных дырок (ΔV_p) и электронов (ΔV_n) в контакте «эмиттер–база» от-

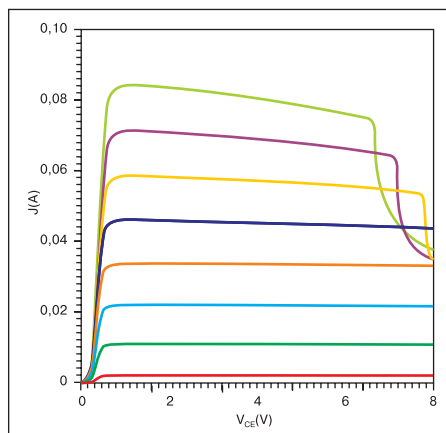


Рис. 12. Типовая ВАХ биполярного гетеротранзистора

личается шириной зазора между AlGaAs эмиттером и GaAs базой, поэтому можно написать:

$$g \times (\Delta V_p - \Delta V_n) = \Delta E_g,$$

где

$$\Delta E_g = E_g(\text{AlGaAs}) - E_g(\text{GaAs}).$$

Это небольшое различие влияет на коэффициент I_n/I_p , где I_n — ток инжектированных электронов из эмиттера в базу, а I_p — нежелательный ток инжектированных дырок из базы в эмиттер. Эти токи могут быть выражены, применяя аппроксимацию Больцмана:

$$I_n = q \times A \times N_E \times (D_n/W) \times e^{-(q \times \Delta V_n / k \times T)},$$

$$I_p = q \times A \times N_E \times (D_p/L_p) \times e^{-(q \times \Delta V_p / k \times T)},$$

где q — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; A — площадь контакта «эмиттер — база»; D_n — коэффициент диффузии электронов в базу; D_p — коэффициент диффузии дырок в эмиттер; W — ширина базы; N_E — концентрация легирования эмиттера; L_p — длина диффузии дырок в эмиттер.

Из полученных формул получаем следующую зависимость для отношения рассматриваемых токов:

$$I_n/I_p = (D_n/D_p) \times (L_p/W) \times (N_E/N_B) \times e^{\Delta E_g/kT}.$$

Для арсенида галлия $\Delta E_g \approx 14,6kT$, соответственно, $\exp(\Delta E_g/kT) \approx 2 \times 10^6$, поэтому можно осуществлять высокое легирование базы и низкое легирование эмиттера без существенного снижения усиления по току. Практически же обычно осуществляют легирование базы таким образом, чтобы усиление транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, составляло порядка 100 раз. Низкое легирование эмиттера приводит к снижению емкости контакта «эмиттер–база», что позволяет работать транзистору на более высоких частотах.

В результате протекания физических процессов старения надежность биполярных гетеротранзисторов может ухудшаться вследствие возникновения следующих факторов:

- Снижение усиления по току и увеличение напряжения «база–эмиттер» при высоких токах эмиттера;

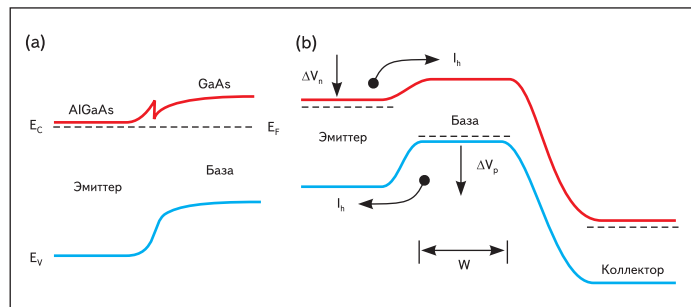


Рис. 13. Энергетические диаграммы НВТ

- Увеличение сопротивления контактов, вызванное деградацией связи между омическими контактами эмиттера (металлизацией) и полупроводниковой областью эмиттера. Для решения этой проблемы может быть использован контактный слой из материала InGaAs.
- Разрастание кристаллических дефектов в контакте «эмиттер–база»;
- Дрейф усиления по току (снижение) и увеличение напряжения «база–эмиттер» для конкретного тока коллектора, вызванное окислением мезоструктуры эмиттера в области контакта «эмиттер–база».

Технология изготовления НВТ

Типовая технология изготовления биполярных гетеротранзисторов состоит из нескольких этапов травления для открытия нужных областей и формирования электрических контактов на каждом слое. В заключение устройство изолируется и на нем формируются требуемые межсоединения.

Базовые шаги техпроцесса показаны на рис. 14.

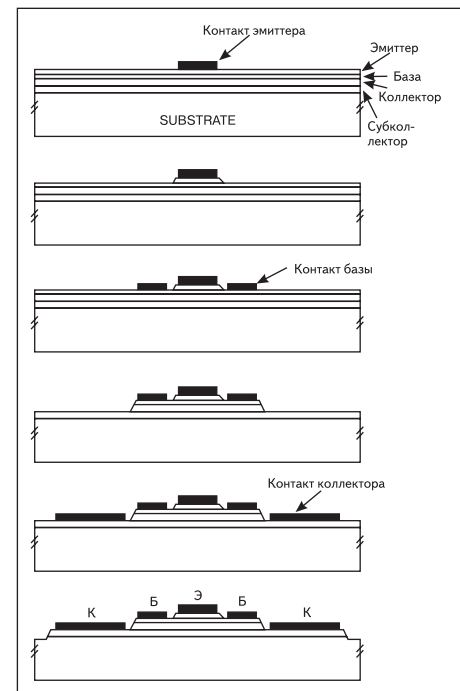


Рис. 14. Последовательность изготовления биполярного гетеротранзистора

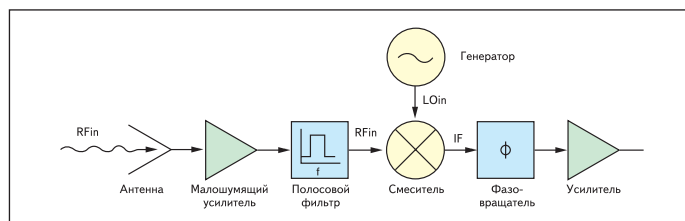


Рис. 15. Типовая структурная схема СВЧ-приемника

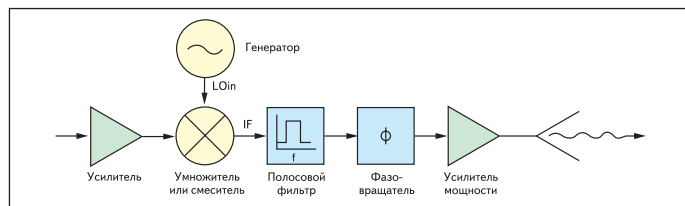


Рис. 16. Типовая структурная схема СВЧ-передатчика

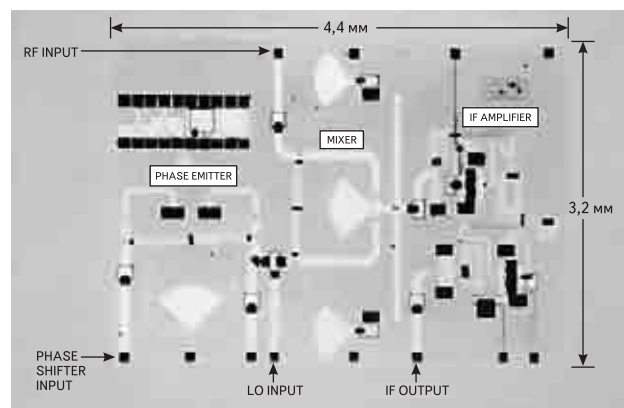


Рис. 17. Топология и конструкция приемника диапазона 30 ГГц

Типы GaAs МИС и их надежность

Как говорилось выше, монокристаллические интегральные схемы используются в спутниковых системах, поэтому к ним предъявляются требования как можно меньшей массы и размеров, высокой надежности, небольшой цены. Эти микросхемы используются в том случае, когда паразитные реактивности в гибридных интегральных микросхемах снижают качество устройства ниже предельно допустимого уровня, поэтому основной областью применения монокристаллических микросхем являются устройства, работающие в диапазонах СВЧ. Примерами систем, реализуемых на монокристаллических ИС, могут являться приемники и передатчики для систем коммуникаций, фазированные антенные решетки, в которых требуется обеспечить небольшие размеры и однородные характеристики схем, а также датчики и радары, работающие на высоких частотах. Наибольшую долю рынка занимают среди МИС микроволновые приемники и передатчики, упрощенные схемы которых указаны на рис. 15–16.

В приведенных обеих схемах фазовращатель может быть размещен в локальном генераторе (ЛГ), на входе или выходе системы. Он необходим для того, чтобы система могла выполнять функцию таким образом, как если бы каждая схема была связана с излучающим элементом фазированной антенной решетки (ФАР). Для других применений схема не изменяется за исключением удаления фазовращателя. Пример одного из монокристаллических приемников диапазона 30 ГГц показан на рис. 17.

Хотя высокий уровень интеграции приемника, показанного на рисунке, снижает затраты на корпусирование и межсоединения, такой уровень интеграции не является необходимым во многих случаях. Наоборот, каждый функциональный блок системы обычно производится на индивидуальном кристалле, что позволяет вести оптимизацию материала и параметров устройства для конкретного

применения. Независимо от уровня взаимосвязи схем надежность целой системы зависит от надежности составных элементов, что видно при рассмотрении схемы приемника, показанной на рис. 15. Входной радиочастотный сигнал имеет очень низкий уровень мощности и может быть в некоторых случаях полностью закрыт шумами. Малошумящий усилитель (МШУ) усиливает принимаемый сигнал, внося в то же время небольшой собственный шум. Если усиление МШУ достаточно велико, его шумовой вклад в шум системы весьма мал, поэтому шум, создаваемый последующими цепями, делится на коэффициент усиления МШУ. Это означает, что усиление и коэффициент шума малошумящего усилителя определяют шумовые характеристики приемника в целом. Если приемник обладает плохими шумовыми параметрами, он не сможет принять слабый сигнал. Принятый сигнал пропускается через узкополосный фильтр и через смеситель. ЛГ генерирует сигнал определенной частоты, который также поступает в смеситель. Смеситель объединяет два сигнала с помощью нелинейного устройства, такого как MESFET или диод, и генерирует сигнал на промежуточной частоте (ПЧ): $(f_{PC} - f_{ЛГ})$ или $(f_{ЛГ} - f_{PC})$, а также гармоники промежуточной частоты, входной радиочастоты (РЧ) и частоты локального генератора. Для выделения требуемых компонентов промежуточной частоты они должны быть отфильтрованы. Эффективность преобразования смесителя обычно зависит от мощности генератора. Кроме того, изменение частоты ЛГ приводит к сдвигу ПЧ, что может вызвать повышенное затухание сигнала в узкополосных фильтрах, являющихся частью смесителя. Если система управляет фазированной антенной решеткой, то направление и форма основного сигнала, излучаемого или принимаемого антенной, зависит от сдвига фазы и уровня мощности каждого передатчика или приемника. Относительная фаза каждого излучаемого элемента устанавливается

с помощью фазовращателя. Таким образом, если сдвиг фазы сигнала, проходящего через цепи, отличается от предполагаемого, качество всей антенны ухудшается. Это означает, что изменение параметров одного из компонентов могут привести к отказу всей системы.

Фазовращатель, локальный генератор и смеситель являются типичными составными частями приемников и передатчиков. Реальные различия между этими двумя системами — в усилителях. Если МШУ используется как приемник, то он должен быть способен усилить слабый сигнал до уровня, достаточного для работы смесителя, и для повышения помехозащищенности системы вносить как можно меньший собственный шум. В передатчике основным требованием является передаваемая мощность и КПД схемы. Поэтому усилитель мощности должен обеспечить усиление сигнала до требуемого уровня.

Малошумящие усилители мощности используются для усиления мощности радиочастотного сигнала. Почти во всех системах это выполняется при помощи транзисторов MESFET и HEMT или усиления тока в HBT. Наиболее точная работа усилителя — при низких уровнях мощности. К сожалению, при повышении уровня мощности усилитель становится нелинейным. При работе в нелинейной области выходная мощность меньше, чем сумма входной мощности и коэффициента усиления усилителя в линейной области. На рис. 18 показана типичная характеристика усилителя. Точка, в которой выходная мощность падает на 1 дБ относительно линейного экстраполированного значения, называется «точка 1-дБ компрессии». Это значение различается для малосигнальных или линейных усилителей от этого же значения усилителя мощности. Необходимо учитывать, что это является также критерием различия маломощных и мощных транзисторов, поскольку транзистор может рассматриваться как простой несогласованный усилитель. Это различие важно при изучении механизмов

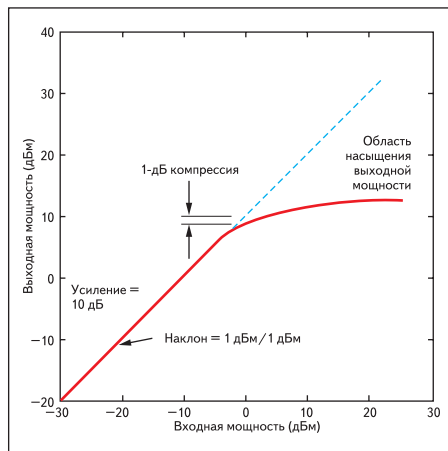


Рис. 18. Типовая передаточная характеристика усилителя

отказов, необходимых для обеспечения надежности устройства.

Выбор точки смещения является очень важным для обеспечения требуемых параметров усилителя. В зависимости от режимов работы транзистора, формы выходного сигнала и, соответственно, КПД усилителя различаются усилители классов А, В и С. Усилители класса А являются линейными, однако их КПД слишком низок, в то время как усилители класса С нелинейны, но обладают самым высоким КПД.

Можно выделить следующие типы МИС:

- Усилители мощности.

Усилители мощности должны оперировать высокими входной и выходной мощностями. Максимальное напряжение входного сигнала ограничивается напряжением пробоя транзистора. Ток через каждый транзистор ограничивается сопротивлением затвора эмиттера. Омические потери преобразуются в тепло, что приводит к нагреванию и снижению надежности устройства. Для увеличения максимально допустимого тока устройства в мощных транзисторах соединяют множество затворов или эмиттеров параллельно. Такое параллельное включение увеличивает общую ширину затвора или площадь эмиттера и снижает сопротивление, однако в то же время увеличивает сложность согласования входного импеданса транзистора выходным импедансом предшествующего каскада. В дополнение к этому, для обеспечения рассеивания тепла создаются элементы свободного пространства вокруг транзистора, что увеличивает размеры устройства. Для обеспечения отвода тепла от транзисторов мощных усилителей подложку помещают на металлическую или алмазную несущую. КПД усилителей мощности является их критическим параметром. Для анализа работы усилителей обычно производят измерение S-параметров. Транзисторы обладают линейностью лишь при небольших уровнях мощности, а при ее возрастании их нелинейность сильно возрастает. Нелинейность мощных транзисторов

создает интермодуляционные искажения, кратные частоте входного сигнала: $2f_{\text{PЧ}}$, $3f_{\text{PЧ}}$ и т. д. Появление этих частот в согласованных цепях может привести к искажениям, паразитной генерации, снижению КПД и т. д. Интермодуляционные искажения определяются как коэффициент отношения мощности сигнала на частоте искажений к мощности полезного сигнала и обычно приводится в дБ. Кроме проблем, связанных с перегревом, усилители мощности имеют такие механизмы отказа, как ловушки горячих электронов, электромиграция и диффузия металла.

- Малошумящие усилители (МШУ).

Так как малошумящие усилители используются для усиления принятых сигналов в приемниках, они разрабатываются для очень малых уровней мощностей. Поэтому температурные проблемы, а также проблемы высоких токов и напряжений, влияющих на надежность усилителя, не присущи МШУ. Наиболее важным показателем качества МШУ является коэффициент шума. Поскольку НЕМТ и РНЕМТ обладают наименьшими коэффициентами шума, именно они используются практически во всех МШУ. Для снижения коэффициента шума требуется небольшая длина затвора и низкое паразитное сопротивление между затвором и истоком. Типичными значениями длины затвора являются 0,1–0,25 мкм. Факторами ненадежности в таких транзисторах являются погружение металла затвора и диффузия омических контактов, которые возникают вследствие слишком малой длины затвора и соответственно малой толщины канала. Для снижения коэффициента шума системы в целом важно снизить потери в цепях, особенно перед первым каскадом МШУ. Это включает линию передачи от антенны к устройству. Кроме снижения потерь в цепях, шум может быть уменьшен при работе усилителя на низких температурах, токах и напряжениях. Наконец, коэффициент шума МШУ зависит от степени согласования цепей, которые проектируются с учетом минимизации коэффициента шума и максимизации усиления. Оптимальным с этой точки зрения является НЕМТ.

- Смесители.

Смесители преобразуют входной сигнал на одной частоте в сигнал на другой частоте, что необходимо для фильтрации сдвига фазы и других операций обработки данных. Например, система может принимать данные в W-диапазоне (74–110 ГГц), но фильтры для W-диапазона имеют низкую добротность и высокие потери, которые приводят к деградации шумовых характеристик приемника. Поэтому выгодно сдвинуть частоту принимаемого сигнала, где возможно применение высокодобротных фильтров с низкими вносимыми потерями. В идеале эта операция выполняется без снижения амплитуды входного сигнала или внесения дополнительных шумов. Смесители могут быть выполнены либо на диодах, либо на одном из транзисторов. Рассмотрим смеситель на диоде, представленный на рис. 19.

Через зажимы диода проходят два сигнала: от локального генератора и от сигнала РЧ.

Обычно желаемая выходная частота ($f_{\text{PЧ}} - f_{\text{ЛГ}}$) — промежуточная частота. Основным показателем качества для смесителей является отношение мощности ПЧ к мощности РЧ, которое называется потерями преобразования и указывается в дБ. Несколько причин могут вносить вклад в увеличение потерь преобразования. Во-первых, это может быть плохое согласование импедансов на РЧ и ПЧ-портах. Во-вторых, это ВАХ диода. В зависимости от требуемых параметров смесители могут быть выполнены как на одном диоде или полевом транзисторе, так и нескольких, вплоть до 8 диодов. Более сложные устройства используют симметричные цепи для нейтрализации нежелательных частотных компонентов и облегчения устранения шумов, созданных изменением амплитуды в локальном генераторе. Недостатком смесителей с несколькими диодами или полевыми транзисторами является необходимость увеличения выходной мощности локального генератора, что сложно получить на высоких частотах. Проблема надежности смесителя ассоциируется с генерацией нежелательных гармоник, которые могут привести к паразитной генерации других цепей микросхемы, искажениям сигнала, появлению $1/f$ шума.

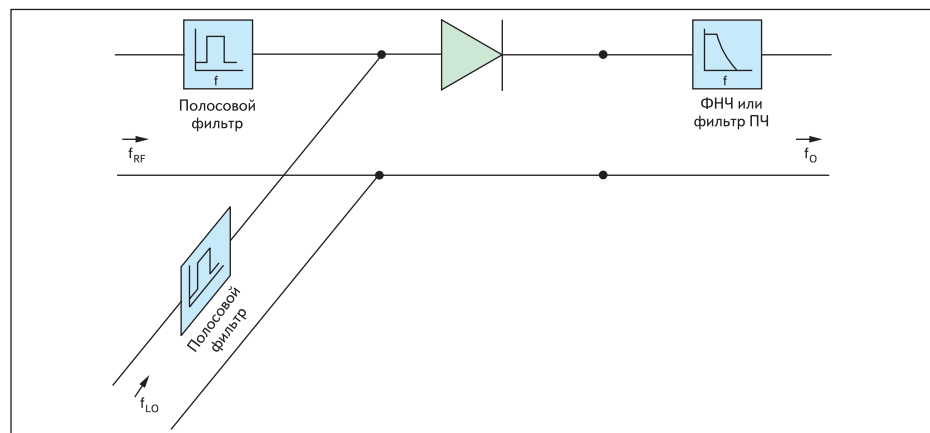


Рис. 19. Смеситель на СВЧ-диоде

- Генераторы.

Генераторы вырабатывают высокочастотные периодические сигналы и используются в модуляторах, супергетеродинных приемниках, цепях фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В основном генератор может быть получен из любого усилителя посредством введения положительной обратной связи. Генераторы обычно строятся на базе МШУ с петлей обратной связи, вносящей задержку, кратную 2π . Кроме того, весьма распространенной является такая разновидность генератора, как ГУН (генератор, управляемый напряжением). Генератор разрабатывается таким образом, чтобы обеспечить требуемую емкостную и токовую нагрузку. Критическими параметрами генераторов являются долговременная нестабильность частоты, уровень шумов, выходной импеданс. Фазовый шум генератора — это кратковременная нестабильность генерируемого радиочастотного сигнала. При использовании генераторов в РЛС, а также в цифровых системах телекоммуникаций, необходимо обеспечивать определенный уровень фазового шума, в противном случае фазовый шум может привести к ошибке системы, а в случае передачи данных — к их искажению.

Шум может генерироваться различными механизмами. Во-первых, причиной может являться кинетическая энергия электронов, которая пропорциональна температуре материала. Этот вид шума обычно называют тепловым шумом. Тепловой шум занимает очень широкую полосу, поэтому его часто называют белым шумом. Вторым типом шума, пропорционального $1/f$, является фликкер-шум. Он возникает в активных твердотельных устройствах вследствие генерации и рекомбинации основных носителей на поверхности полупроводника. Примерный спектр шума показан на рис. 20.

Для минимизации фазового шума требуется использовать высокочастотные резонаторы. Кроме того, необходимо использовать транзисторы с низким фликкер-шумом. Использование высокочастотных резонаторов в МИС весьма затруднено, поскольку тонкопленочные элементы на арсенидгаллиевых подложках имеют высокие потери проводимости.

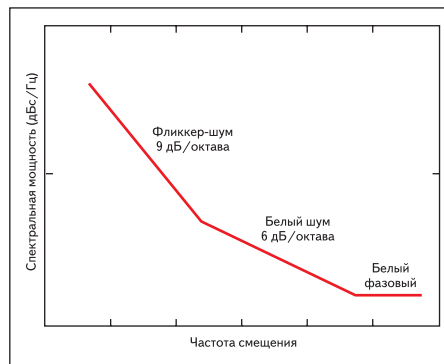


Рис. 20. Типовой спектр шума генератора

Из всех рассмотренных транзисторов самым меньшим фликкер-шумом обладают биполярные гетеротранзисторы (НВТ). Поэтому именно они чаще всего используются в генераторах. Воздействие температуры может приводить к дрейфу параметров транзисторов, что приводит к сдвигу частоты или срыву генерации. Температурная компенсация может быть построена с помощью варакторов или других управляемых элементов.

Вместо заключения

Постоянно растущие требования к объемам передаваемой информации с одновременным снижением массо-габаритных параметров устройств обеспечивают непрерывное динамичное развитие как конструкции МИС СВЧ, так и технологии их производства. Что же будет дальше? В каком направлении будет развиваться интегральная технология РЧ и СВЧ устройств? Очевидным глобальным направлением развития будут широкополосные и сверхширокополосные СВЧ-приборы. Что касается конструкции, то это, в первую очередь, совершенствование конструктивно-технологических особенностей МИС СВЧ, обработка технологии изготовления микросхем на подложках из карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN), создание серийной технологии изготовления микросхем на сапфировых подложках. Другим важным направлением развития микро-

схем этого класса является создание устройств с крайне высокой плотностью мощности: более 1 Вт на 1 мм длины затвора. Постоянное совершенствование конструкции и технологии МИС СВЧ, появление новых активных элементов микросхем, приводит к необходимости модификации моделей надежности, построению новых, включающих новые механизмы отказов, связанных с использованием новых материалов и технологий. Кроме того, несмотря на наличие хорошо отработанных методов статистического прогнозирования надежности, годных для применения к серийным микросхемам, методы оценки индивидуальной надежности, необходимые для сопоставления единичных образцов МИС СВЧ, используемых в военной и космической технике, пока отработаны недостаточно хорошо. Среди таких методов можно выделить различные методы спектроскопии, с подсветкой вспомогательным источником и без нее. Однако многие из методов прогнозирования индивидуальной надежности МИС СВЧ являются разрушающими, что недопустимо при высокой стоимости микросхем, другие же не обеспечивают требуемую достоверность. В такой ситуации встает задача: оценить надежность конкретного экземпляра устройства по результатам неразрушающих измерений каких-либо его электрофизических параметров. Если в отношении проблемы выбора таких информативных параметров можно сказать, что она решена, то относительно наличия достоверных математических моделей на их основе этого сказать нельзя. Поэтому эта задача на данный момент является весьма актуальной и, вероятно, в скором времени будет решена. ■

Литература

1. John R. Scarpulla. Reliability and Qualification Challenges for RF Devices. The Aerospace Corporation, Los Angeles, 2004.
2. GaAs MMIC Reliability Assurance Guideline for Space Applications. Sammy Kayali, George Ponchak, Roland Shaw. NASA Lewis Research Center, 1996.
3. Гуртов В. А. Твердотельная электроника. Москва, 2005.