Монолитные интегральные схемы СВЧ на основе гетероструктурных GaAs pin-диодов

Алексей Ющенко, Геннадий Айзенштат, Владимир Божков, Евгений Монастырёв (Томск)

В статье представлены результаты разработки коммутационных и ограничительных pin-диодных СВЧ МИС на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs. Разработанные микросхемы не имеют прямых аналогов в России и не уступают зарубежным аналогам.

Введение

Pin-диоды нашли широкое применение в технике СВЧ. На их основе могут быть реализованы схемы управления уровнем и фазой СВЧ-сигналов, а также коммутаторы СВЧ-мощности в линиях передачи [1].

На сегодняшний день существуют технологии создания pin-диодных монолитных интегральных схем (МИС) на основе кремния, арсенида галлия и фосфида индия. Схемы, изготовленные по кремниевой технологии [2], отличаются высокой мощностью, но ограничены рабочей частотой до 20...25 ГГц и сложны в изготовлении. Схемы на основе фосфида индия серийно не выпускаются. Сравнительно простая технология GaAs позволяет создавать МИС с предельно высокими параметрами, является наиболее востребованной и активно развивается [2, 3].

Схемы коммутаторов СВЧ-мощности

Для реализации СВЧ МИС использовалась технология создания pin-диодов на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs. По сравнению с гомоструктурными, диоды на основе структуры AlGaAs/GaAs отличаются меньшим последовательным сопротивлением при том же уровне управляющего тока. Изготовленные гетероструктурные диоды характеризуются следующими параметрами: вносимые потери открытого диода 0,28...0,4 дБ в частотном диапазоне 0,1...40 ГГц, что соответствует прямому сопротивлению потерь ($r_{пр.}$) 3,5...4,5 Ом, при этом развязка в закрытом состоянии диода соответствует эквивалентной ёмкости ($C_д$) 30 фФ. Характеристики полученных диодов соответствуют зарубежным аналогам. Ближайшими отечественными аналогами являются кремниевые pin-диоды 2А533(А-Г)-3 и 2А566(А-Б)-3 [4], которые по своим параметрам немного превосходят GaAs-приборы. Однако при использовании GaAs pin-диодов в составе монолитных интегральных схем их недостатки полностью компенсируются.

Микросхемы переключателей SPDT для С- и Х-диапазонов частот

На рисунке 1а показана фотография монолитной интегральной схемы pin-диодного коммутатора Х-диапазона. Подобную топологию имеет и микросхема С-диапазона. Размер кристалла МИС составляет 2,2 × 2,5 × × 0,1 мм.

Микросхемы изготовлены на гетероструктурах AlGaAs/GaAs. Наряду с технологическими процессами изготовления pin-диодов [5], технология МИС включала процессы, связанные с формированием резисторов из силицида вольфрама, конденсаторов на основе Ta_2O_5, сквозных отверстий химическим травлением с последующей металлизацией обратной стороны пластины и разделением пластины на кристаллы методом дисковой резки. Как отмечалось ранее [5 – 7], дискретные СВЧ pin-диоды на основе арсенида галлия являются источниками инфракрасного излучения. На фотографии (см. рис. 1а) хорошо видно, что и в интегральной схеме коммутатора в рабочем режиме прямосмещённые диоды также излучают свет, что позволяет оценить тепловое сопротивление МИС R_T = 250...300°С/Вт (методика определения теплового сопротивления GaAs СВЧ pin-диода по спектрам его излучения описана в [6, 7]). Измеренные параметры МИС Х-диапазона приведены на рисунке 1б.

Микросхема коммутатора С-диапазона в полосе частот 4...8 ГГц характеризуется вносимыми потерями (IL) не более 0,75 дБ, коэффициентами отражения вход/выход (|s11| и |s22|) не более –17 дБ и развязкой между каналами (ISOL) не менее 46 дБ. МИС коммутатора Х-диапазона в полосе частот 8...12 ГГц (см. рис. 1б) характеризуется вносимыми потерями (IL) не более 0,7 дБ, коэффициентами отражения вход/выход (|s11| и |s22|) более –20 дБ и развязкой между каналами (ISOL) не менее 42 дБ. Изготовленные МИС могут работать в более широком диапазоне частот при незначительном ухудшении параметров. Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по выходу составляет 20 дБм (8 ГГц).

Разработанные микросхемы коммутаторов С- и Х-диапазонов частот по своим параметрам соответствуют зарубежным аналогам (например, TGS2302 [3]). В России прямые аналоги отсутствуют.

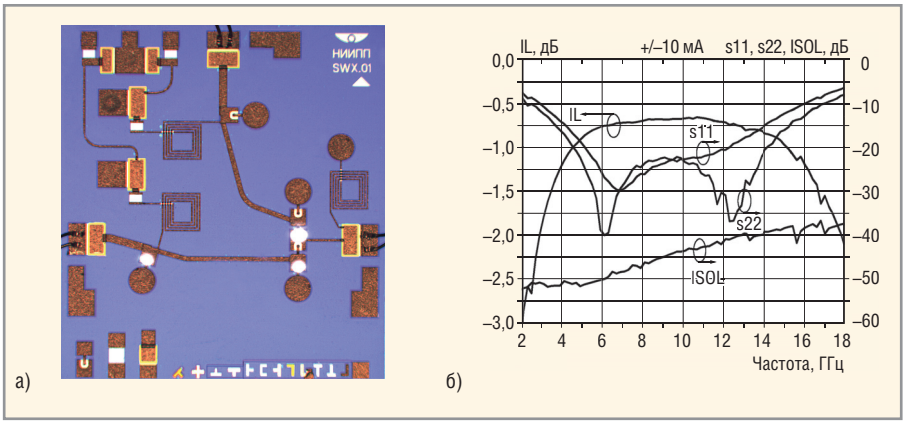


Рис. 1. Фотография кристалла микросхемы Х-диапазона (а) и её измеренные характеристики (б)

Микросхемы сверхширокополосных переключателей SPST, SPDT и SP4T (0,5...40 ГГц)

Наряду с представленными МИС коммутаторов С- и Х-диапазонов частот разработан комплект МИС сверхширокополосных переключателей SPST, SPDT и SP4T для диапазона частот 0,5...40 ГГц. Прямыми аналогами схем являются зарубежные МИС фирмы M/A-COM: MA4AGSW1, MA4AGSW2 и MA4AGSW4. Отечественные аналоги отсутствуют. Размеры кристаллов МИС коммутаторов SPST и SPDT составляют 1,1 × 0,92 × 0,1 мм. Размер кристалла МИС коммутатора SP4T составляет 1,6 × 1,5 × 0,1 мм. Особенностью представленных МИС является то, что схемы не имеют внутренних цепей смещения, что позволяет использовать МИС в широком диапазоне частот. Фотография и измеренные параметры схемы переключателя SP4T представлены на рисунке 2.

Вносимые потери (IL) переключателя SPST в рабочем диапазоне частот (0,5...40 ГГц) не превышают 1 дБ, а изоляция (ISOL) составляет не менее 25 дБ. Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по выходу составляет 33 дБм при управляющем напряжении –8 В. Полное запирание схемы обеспечивается током порядка 5...10 мА. Микросхемы коммутаторов SPDT и SP4T характеризуются вносимыми потерями не более 1,8 дБ, изоляцией не менее 28...30 дБ и имеют верхнюю границу линейности амплитудной характеристики по выходу порядка 20 дБм (10 ГГц) при управляющем токе 10 мА на канал. Все представленные МИС могут работать при меньших токах управления (единицы миллиампер) и в более широком диапазоне частот (свыше 40 ГГц) при незначительном ухудшении параметров.

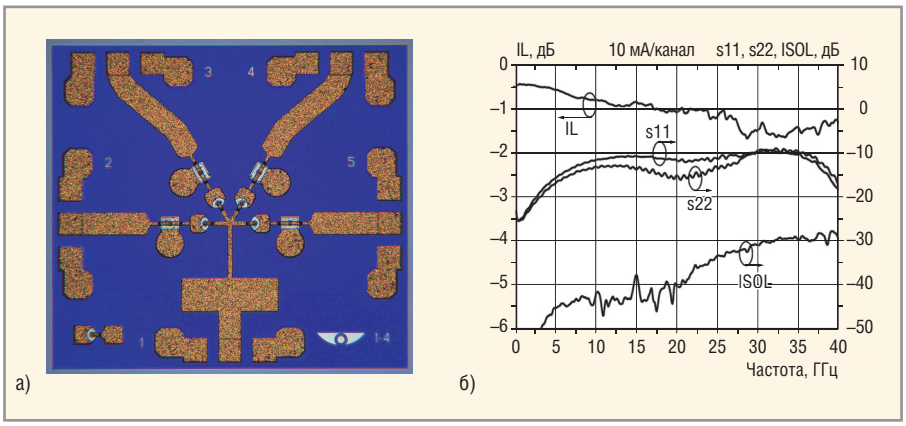


Рис. 2. Фотография кристалла переключателя SP4T (а) и его измеренные характеристики (б)

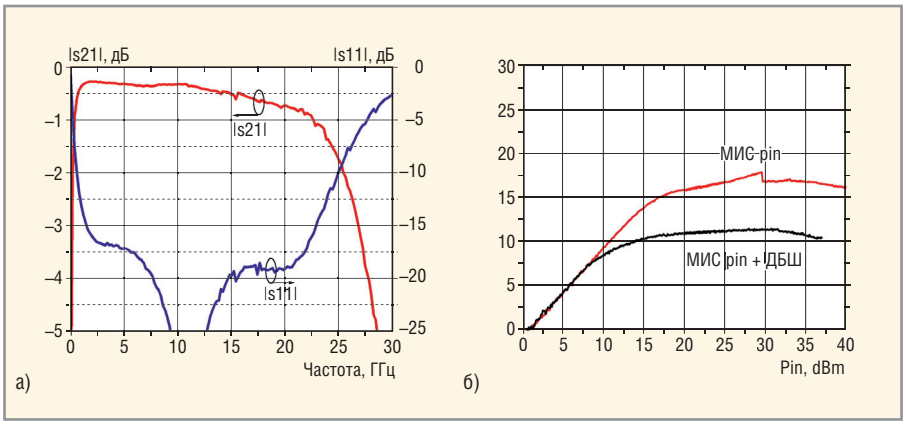


Рис. 3. Экспериментальные характеристики микросхемы защитного устройства

Схемы ограничителей СВЧ-мощности

Схемы ограничителей мощности используются для защиты малошумящих усилителей (МШУ) в приёмных трактах СВЧ-аппаратуры. Многие отечественные фирмы занимаются разработкой МИС защитных устройств с использованием диодов Шоттки (ДБШ). Эти схемы характеризуются следующими параметрами: диапазон рабочих частот 0...12 ГГц, вносимые потери 0,3...2 дБ, допустимая входная мощность 33...37дБм, мощность просачивания 10...12 дБм.

Разработан целый ряд монолитных интегральных схем широкополосных ограничителей мощности на основе GaAs pin-диодов. Диапазон рабочих частот МИС составляет 1...22 ГГц, вносимые потери не превышают 0,8...1 дБ, допустимая входная мощность составляет 37 дБм, мощность просачивания 10...18 дБм. По совокупности параметров микросхемы не уступают (некоторые превосходят) зарубежным аналогам (например, TGL2201 [3]).

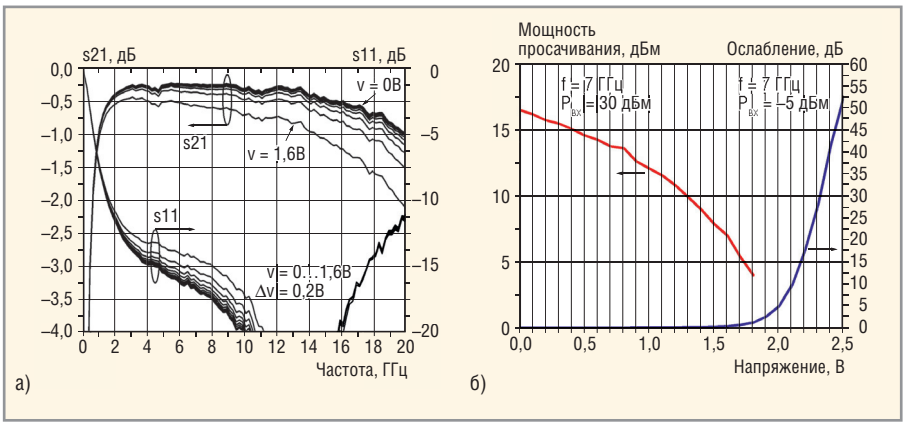


Рис. 4. Экспериментальные характеристики микросхемы ограничителя мощности, управляемого напряжением

Монолитные интегральные схемы ограничителей СВЧ-мощности выполняются на pin-диодах или диодах с барьером Шоттки. Оба класса схем имеют свои преимущества и недостатки. Ограничители мощности на основе pin-диодов характеризуются более широким диапазоном частот, низкими вносимыми потерями и большей допустимой входной мощностью по сравнению с защитными устройствами на ДБШ. Защитные устройства на ДБШ, в свою очередь, характеризуются меньшей мощностью просачивания и большим быстродействием. Все указанные преимущества можно объединить в многокаскадном защитном устройстве, содержащем pin-диоды во входных каскадах и ДБШ на выходе [8].

Разработана технология изготовления МИС, позволяющая получать вертикальные структуры pin-диодов и диодов Шоттки на одном кристалле. Были изготовлены двухкаскадные МИС защитных устройств:

- схема на основе pin-диодов;
- схема, включающая pin-диоды во входном каскаде и диоды Шоттки в выходном каскаде (конструкция схемы защищена патентами РФ № 94765 от 27.05.2010 и № 102846 от 10.03.2011).

При изготовлении кристаллов схем к технологическим операциям создания pin-диодных МИС были добавлены операции, связанные с изготовлением вертикальных структур диодов Шоттки. Сложность изготовления данной схемы обусловлена не только большим количеством технологических операций, но и достаточно высоким рельефом поверхности МИС (примерно 4 мкм). Изготовленные pin-диодные схемы и схемы, содержащие pin-диоды и диоды Шоттки, характеризуются одинаковыми малосигнальными параметрами (см. рис. 3а). Мощность просачивания МИС, включающей pin-диоды и диоды Шоттки, значительно ниже, чем у обычной pin-диодной схемы (см. рис. 3б).

Разработанные МИС характеризуются следующими параметрами: полоса рабочих частот Δf = 1...22 ГГц; вносимые потери |s21| < 1 дБ; коэффициенты отражения на входе и выходе |s11| и |s22| >15 дБ; максимальная входная мощность $P_{вх.макс}$ > 37 дБм (5 Вт); мощность просачивания $P_{вых}$ < 18 дБм/11,5 дБм. Для X-диапазона частот (8...12 ГГц) схема характеризуется вносимыми потерями порядка 0,35 дБ и модулями коэффициентов отражения на входе и выходе не менее 20 дБ. Изготовленная микросхема ограничителя мощности по своим параметрам полностью соответствует требованиям к защитному устройству для малошумящего усилителя X-диапазона [9].

На основе результатов исследований характеристик созданных GaAs гетероструктурных pin-диодов была создана ещё одна МИС ограничителя мощности (заявка на изобретение № 2011102631 от 24.01.2011). В данной схеме можно управлять уровнем просачивающейся мощности и величиной вносимых потерь.

На рисунке 4а представлено семейство зависимостей вносимых и обратных потерь от частоты, измеренное при разных смещениях. Диапазон рабочих частот МИС составил 2...20 ГГц. При увеличении смещения от нуля до 1,4 В происходит незначительный рост потерь. Эксперимент показал (см. рис. 4б), что при изменении управляющего напряжения от 0 до 1,4 В уровень просачивающейся мощности снижается от 17 до 8 дБм. Максимальная входная мощность устройства составляет не менее 37 дБм. Разработанная микросхема может быть также использована в качестве управляемого аттенюатора или «выключателя». Глубина изоляции МИС в X-диапазоне составляет не менее 40 дБ при управляющем токе 10 мА.

Заключение

Выполнен комплекс работ, позволивший заложить основы нового для страны научно-технического направления по созданию монолитных интегральных схем СВЧ на основе гетероструктурных pin-диодов на арсениде галлия. В рамках этого направления разработаны и реализованы МИС переключателей, не уступающие зарубежным аналогам, а также оригинальные схемы ограничителей мощности, по совокупности параметров превосходящие зарубежные аналоги.

Литература

1. *Наливайко Б.А., Берлин А.С., Божков В.Г.* Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды: Справочник. РАСКО, 1992.
2. www.macomtech.com.
3. www.triquint.com.
4. www.npptez.ru.
5. *Айзенштат Г.И., Божков В.Г., Ющенко А.Ю., Монастырев Е.А.* Гетероструктурные p-i-n-диоды. Материалы конф. КрыМиКо'2010. Севастополь, 2010. С. 169–170.
6. *Айзенштат Г.И., Божков В.Г., Ющенко А.Ю., Монастырев Е.А., Добуш И.М.* СВЧ p-i-n-диоды на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs. Изв. Вузов: Физика. 2010. № 9/2. С. 310–314.
7. *Айзенштат Г.И., Ющенко А.Ю., Гущин С.М., Дмитриев Д.В., Журавлев К.С., Торопов А.И.* Рекомбинация носителей заряда в арсенидогаллиевом p-i-n-диоде. Физика и техника полупроводников. 2010. Том 44. Вып. 10. С. 1407–1410.
8. *Seong-Sik Yang, Tak-Young Kim, Deok-Kyu Kong, So-Su Kim, and Kyung-Whan Yeom.* A Novel Analysis of a Ku-Band Planar p-i-n Diode Limiter. IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 2009. Vol. 57. No. 6. PP. 1447–1460.
9. *Ющенко А.Ю., Айзенштат Г.И., Божков В.Г., Монастырев Е.А., Добуш И.М.* Гетероструктурные монолитные интегральные схемы малошумящего усилителя X-диапазона и pin-диодного ограничителя мощности. Тезисы докладов НПК по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. НИЯУ МИФИ. 2011. С. 26–27.

Новости мира News of the World Новости мира

Infineon: приёмный модуль GPS и ГЛОНАСС

В компании Infineon имеются приёмные модули, которые поддерживают приём глобальных навигационных спутниковых систем GPS (Global Positioning System) и ГЛОНАСС (или раздельно, или одновременно). Модули семейства BGM103xN7 располагаются в корпусе размером 2,3 × 1,7 × 0,73 мм. Серия состоит из трёх модулей для специфических приложений:

- *BGM1033N7*: стандартное решение со спецификациями GPS/ГЛОНАСС, с коэффициентом усиления 14,8 дБ и коэффициентом шума 1,65 дБ;
- *BGM1032N7*: аналогичен по параметрам BGM1033N7, рассчитан на подавление сигналов 13-го диапазона LTE. Наивысшая частота 13-го диапазона LTE равна 787 МГц, и вторая гармоника этой частоты (1574 МГц) располагается в частотном диапазоне GPS;
- *BGM1034N7*: вариант с высоким коэффициентом усиления (17,0 дБ) для систем с большими потерями в тракте сигнала, таких как навигационные приборы и цифровые камеры.

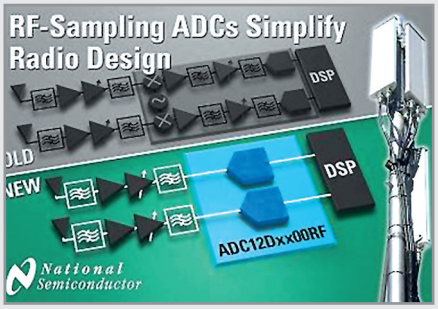
Все модули потребляют 4,0/3,1 мА и предназначаются для переносных электронных приборов. Модули поставляются в корпусе TSNP-7-10 размером 2,3 × 1,7 × × 0,73 мм.

www.infineon.com

Пять 12-битных АЦП прямой дискретизации радиочастотного сигнала

Компания National Semiconductor представила семейство АЦП, поддерживающих прямую дискретизацию радиочастотных сигналов свыше 2,7 ГГц с уровнем интермодуляционных искажений третьего порядка (IMD3) до –71 дБ и частотой преобразования до 3,6 GSPS.

Семейство ADC12Dxx00RF включает пять 12-битных АЦП, позволяющих системным разработчикам отказаться от использования различных каскадов понижающих преобразователей промежуточных частот, включая усилители, смесители и фильтры. Одноканальные АЦП ADC12Dxx00RF способны полностью заменить всю подсистему сигнального тракта, радикально снижая при этом общее число компонентов, размер печатной платы и вес устройств для беспроводных базовых станций связи 3G/4G, военных и гражданских широкополосных систем программно-управляемой радиосвязи (SDR).



Совместимые по выводам АЦП ADC12Dxx00RF дополняют передовое семейство гигагерцовых преобразователей компании National, обеспечивая простое масштабирование производительности от 500 MSPS до 3,6 GSPS.

Для создания завершённого сигнального тракта ADC12Dxx00RF можно использовать совместно с двухканальным усилителем с цифровой регулировкой коэффициента усиления (DVGA) или полностью дифференциальным усилителем компании National Semiconductor, синтезатором частоты LMX2541 или одним из фильтров дрожания тактового сигнала LMK04800 от National.

www.national.com/

Водонепроницаемый потенциометр для передней панели

Компания Vishay представляет первый в мире, по её заявлению, водонепроницаемый металлокерамический потенциометр для установки на передней панели, который полностью герметизирован от проникновения морской воды и удовлетворяет требованиям норм защищённости

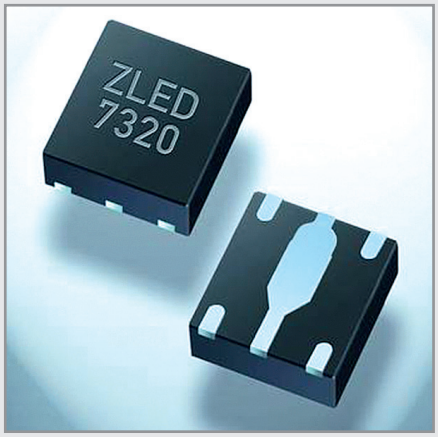
IP68. Потенциометр P13SM с осью и резьбовой частью из высококачественной стали предназначен для приложений, в которых требуется устанавливать потенциометром электрические параметры при погружении в морскую воду на глубину до 30 м.

При коррозионных испытаниях испытаний в солевом тумане элемент выдержал 960 ч. P13SM имеет допустимую нагрузку 1,5 Вт при +70°C и ТКС ±75 × 10^{-6}/°C (тип.). Потенциометр предлагается с осью диаметром 3,17 и 6 мм и различной длины. Он рассчитан на работу в температурном диапазоне –55…+125 °C. Новый металлокерамический потенциометр уже предлагается в образцах и в производственных партиях.

www.vishay.com

Микросхема управления для светодиодных ламп

Фирма ZMD сообщает о наличии ZLED7320, нового представителя её семейства ZLED7x20 с 40-вольтовыми микросхемами управления светодиодами. ZLED7320 работает, по данным производителя, с КПД до 98% и предлагается в корпусе DFN-5. Драйвер содержит коммутирующий транзистор и обеспечивает изменение яркости свечения в диапазоне 1200 : 1 с помощью ШИМ-сигнала или фиксированного напряжения.



С выхода схемы с High-Side Current-Sensing выдаётся ток до 1 А с точностью ±3%. К внутренним функциям защиты ZLED7320 относятся функция отключения при температурной перегрузке, а также функции, защищающие драйвер при обрывах или при коротком замыкании. Драйвер работает в приложениях без дополнительного МОП-транзистора.

Для комплектного решения схемы управления светодиодами требуются только четыре пассивных компонента.

www.zmdi.com/