

УДК 621.382.323; 621.382.233; 321.3.049.774

А.Ю. Ющенко, Г.И. Айзенштат, Е.А. Монастырев, В.Г. Божков

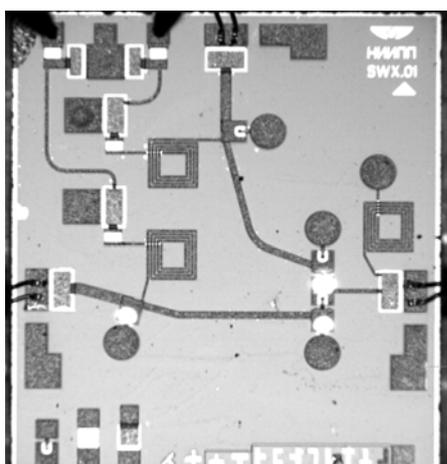
СВЧ-монокристалльные интегральные схемы широкополосных коммутаторов и ограничителей мощности на основе гетероструктурных арсенидгаллиевых рпн-диодов

Представлены результаты ОАО «НИИПП» по разработке коммутационных и ограничительных рпн-диодных СВЧ МИС на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs.

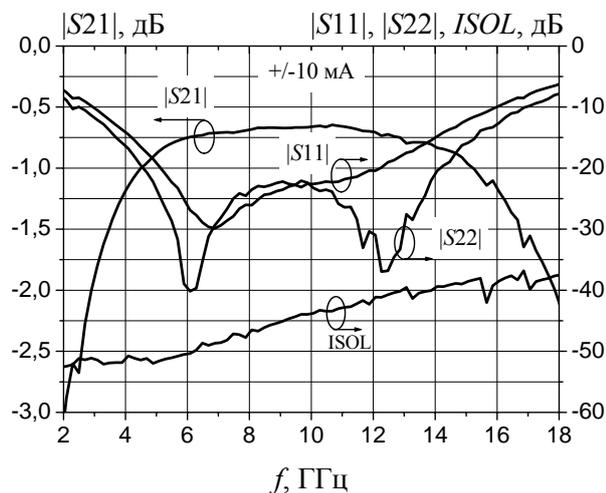
Ключевые слова: монокристалльная интегральная схема, СВЧ, рпн-диод, коммутатор, ограничитель.

Схемы коммутаторов СВЧ-мощности. Для создания СВЧ монокристалльных интегральных схем (МИС) использовалась разработанная в ОАО «НИИПП» технология создания рпн-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. СВЧ рпн-диоды, изготавливаемые в ОАО «НИИПП», характеризуются вносимыми потерями в открытом состоянии при управляющем токе 10 мА порядка 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 его развязка в закрытом состоянии соответствует эквивалентной емкости (C_d) 25–30 фФ. Характеристики полученных диодов соответствуют зарубежным аналогам (например, MA4GP907, MA4AGB1P912 ф. М/А-СОМ). Ближайшими отечественными аналогами являются кремниевые рпн-диоды 2A533(А-Г)-3 и 2A566(А-Б)-3 (ф. «НПП ТЭЗ») [1], которые по своим параметрам немного превосходят арсенидгаллиевые приборы. Однако при использовании арсенидгаллиевых рпн-диодов в составе монокристалльных интегральных схем их недостатки полностью компенсируются.

МИС SPDT-коммутаторов для С- и Х-диапазона частот. На рис. 1 показаны фотография и измеренные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) монокристалльной интегральной схемы рпн-диодного коммутатора Х-диапазона. (Подобную топологию имеет и МИС С-диапазона). Размер кристалла МИС составляет 2,2×2,5×0,1 мм.



а



б

Рис. 1. Фотография кристалла коммутатора Х-диапазона (а) и его измеренные АЧХ (б)

МИС коммутатора Х-диапазона в полосе частот 8–12 ГГц (см. рис. 1, б) характеризуется вносимыми потерями не более 0,7 дБ, коэффициентами отражения вх/вых более –20 дБ и развязкой между каналами не менее 42 дБ. МИС коммутатора С-диапазона в полосе частот 4–8 ГГц характеризуется вносимыми потерями не более 0,75 дБ, коэффициентами отражения вх/вых не более –17 дБ и развязкой между каналами не менее 46 дБ.

Как отмечалось в работах [2–4], дискретные СВЧ рpn-диоды на основе арсенида галлия являются источниками инфракрасного излучения. На фотографии (см. рис. 1, а) хорошо видно, что и в интегральной схеме коммутатора в рабочем режиме прямосмещенные диоды также излучают свет, что позволяет найти тепловое сопротивление МИС: $R_T \sim 250\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (методика определения теплового сопротивления арсенидгаллиевого СВЧ рpn-диода по спектрам его излучения описана в [3, 4]). Представленные МИС могут работать в более широких диапазонах частот при незначительном ухудшении параметров. Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по выходу составляет 20 дБм (8 ГГц).

Разработанные МИС коммутаторов С- и Х-диапазонов частот по своим параметрам соответствуют зарубежным аналогам (TGS2302 ф. TriQuint Semiconductor). В России прямые аналоги отсутствуют.

МИС сверхширокополосных SPST, SPDT и SP4T-коммутаторов (0,5–40 ГГц). Наряду с представленными МИС коммутаторов С- и Х-диапазонов частот в ОАО «НИИПП» был разработан комплект МИС сверхширокополосных SPST-, SPDT- и SP4T-коммутаторов для диапазона частот 0,5–40 ГГц. Прямыми аналогами схем являются зарубежные МИС фирмы M/A-COM: MA4AGSW1, MA4AGSW2 и MA4AGSW4. Отечественные аналоги отсутствуют. На рис. 2 представлены фотографии монокристалльных интегральных схем сверхширокополосных рpn-диодных коммутаторов СВЧ-мощности SPST, SPDT и SP4T. Размер кристаллов МИС коммутаторов SPST и SPDT составляет $1,1 \times 0,92 \times 0,1$ мм. Размер кристалла МИС коммутатора SP4T составляет $1,6 \times 1,5 \times 0,1$ мм. Представленные МИС не имеют внутренних цепей смещения, что позволяет использовать их в широком диапазоне частот. Отсутствие МДМ-конденсаторов и тонкопленочных резисторов в схемах значительно упрощает технологический процесс их изготовления и повышает выход годных кристаллов.

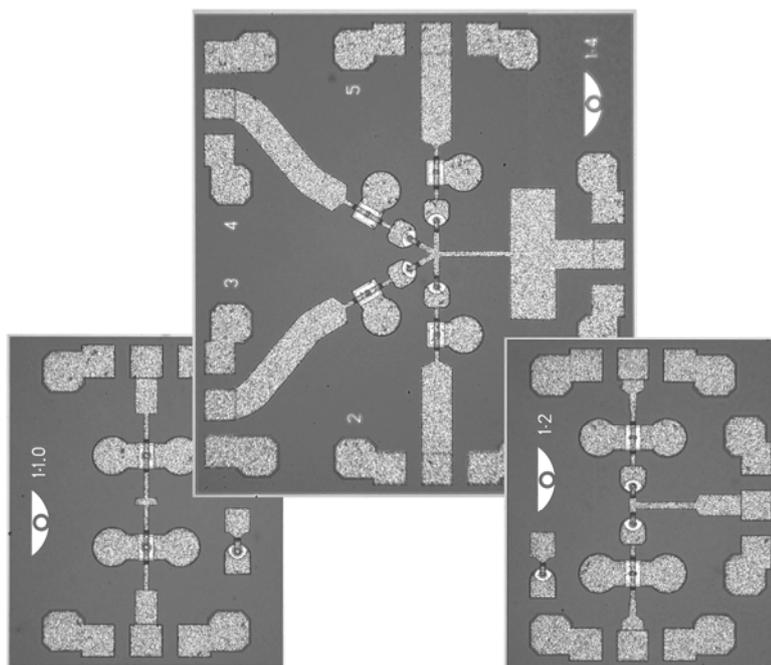


Рис. 2. Фотографии кристаллов МИС

Измеренные параметры схем SPST-, SPDT- и SP4T-переключателей представлены на рис. 3, 4.

Вносимые потери SPST-коммутатора в рабочем диапазоне частот (0,5–40 ГГц) не превышают 1 дБ, а изоляция составляет не менее 25 дБ (см. рис. 3, а). Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по выходу составляет 33 дБм при управляющем напряжении –8 В (см. рис. 3, б). Полное запирающее напряжение обеспечивается током порядка 5–10 мА.

МИС коммутаторов SPDT (рис. 4, а) и SP4T (рис. 4, б) 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 (8 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.

Необходимо отметить, что представленные данные являются результатом первой итерации проектирования топологий схем, их измерения и уточнения СВЧ-моделей рin-диодов. Проведенные эксперименты показали, что параметры этих схем можно существенно улучшить.

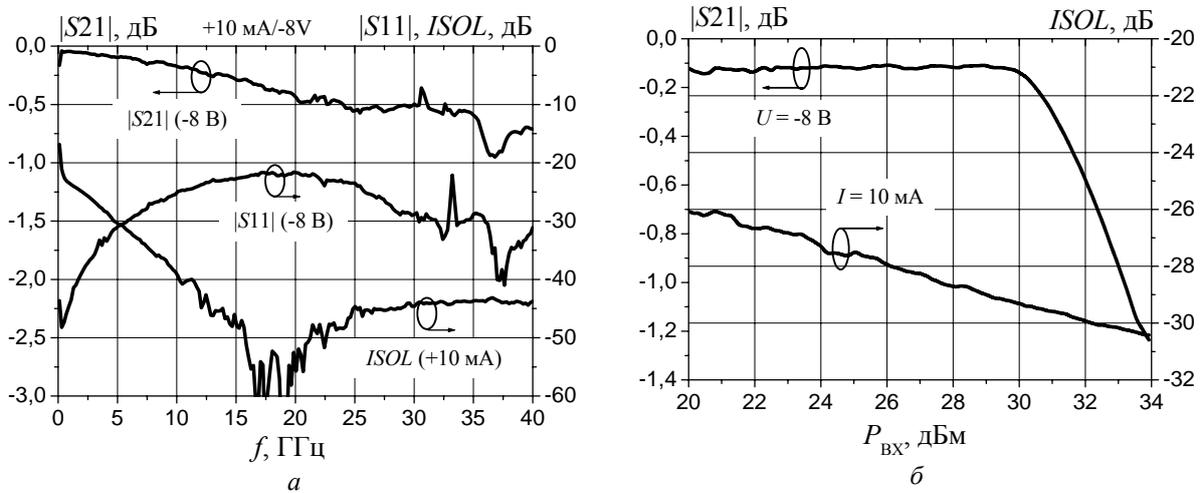


Рис. 3. Измеренные АЧХ (а) и динамические характеристики (б) МИС SPST-коммутатора

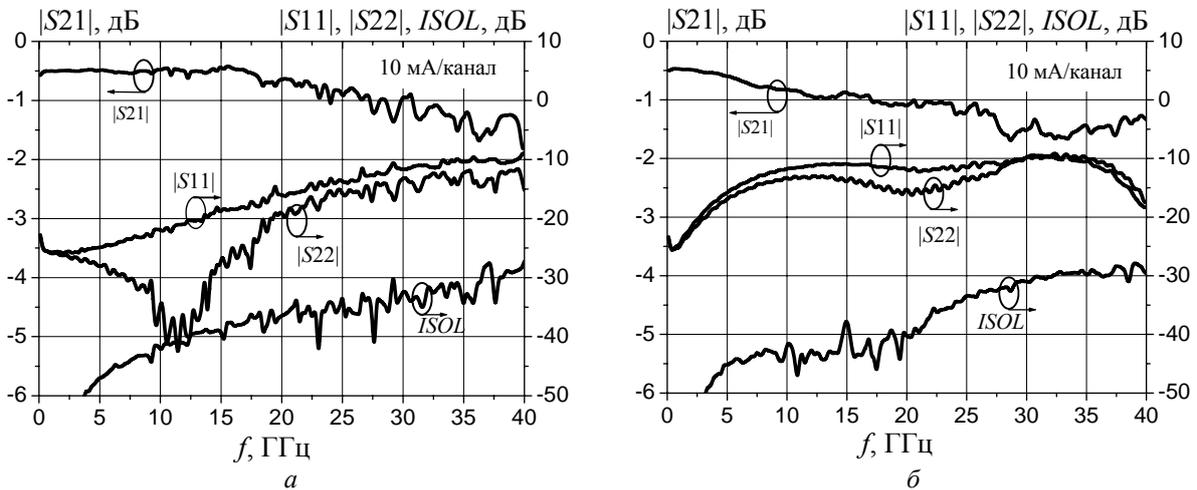


Рис. 4. Измеренные АЧХ МИС SPDT- (а) и SP4Т-переключателей (б)

Схемы защитных устройств с улучшенными ограничительными характеристиками. Многие отечественные фирмы (ЗАО «НПФ Микран», г. Томск, ЗАО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург, ФГУП НПП «Исток», г. Фрязино, НИИ Радиосвязи, г. Ростов-на-Дону) и др.) занимаются разработкой МИС защитных устройств с использованием диодов Шоттки (ДБШ). Эти схемы характеризуются следующими параметрами: диапазон рабочих частот 0–12 ГГц, вносимые потери 0,5–2 дБ, допустимая входная мощность 33–37 дБм, мощность просачивания 10–12 дБм.

В ОАО «НИИПП» разработан целый ряд монолитных интегральных схем широкополосных ограничителей мощности на основе арсенидгаллиевых рin-диодов. Диапазон рабочих частот МИС составляет 1–22 ГГц, вносимые потери не превышают 0,8–1 дБ, допустимая непрерывная входная мощность составляет 37 дБм, мощность просачивания ~ 10–18 дБм. По совокупности параметров схемы соответствуют (некоторые превосходят) зарубежным аналогам (например, TGL2201 ф. TriQuint Semiconductor).

В работе [5] представлены результаты разработки МИС рin-диодного ограничителя мощности. Разработанная схема характеризуется следующими параметрами: полоса рабочих частот 1–22 ГГц; вносимые потери не более 1 дБ; коэффициенты отражения на входе и выходе не более –15 дБ; максимальная непрерывная входная мощность не менее 37 дБм (5 Вт); мощность просачивания не более 18 дБм (60 мВт). Для X-диапазона частот (8–12 ГГц) схема характеризуется вносимыми потерями порядка 0,35 дБ и модулями коэффициентов отражения на входе и выходе не более –20 дБ.

Данная МИС ограничителя мощности по своим параметрам полностью подходит в качестве защитного устройства для маломощного усилителя X -диапазона, разработанного в ОАО «НИИПП» [5]. Несмотря на превосходные характеристики полученных защитных устройств, достигнутый уровень просачивающейся мощности не является безопасным для многих маломощных усилителей других фирм, допустимая входная мощность которых не превышает 10–12 дБм (например, МШУ фирмы Mimix Broadband). Для решения данной проблемы были разработаны защитные устройства с пониженной мощностью просачивания.

МИС pin -диодного ограничителя мощности, управляемого напряжением. Известно, что минимальный уровень просачивающейся мощности в существующих схемах ограничителей напрямую зависит от напряжения «включения» диода U_{on} и жестко задан видом вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода. Поскольку невозможно существенно изменить ВАХ pin -диода без изменения материалов полупроводниковой диодной структуры, была сделана попытка модернизировать известную схему ограничителя [6]. Эта попытка опиралась на данные исследований характеристик созданных GaAs гетероструктурных pin -диодов. Эксперимент показал, что при подаче на pin -диод положительного смещения величиной меньшей U_{on} , ёмкость диода меняется слабо. Так, при изменении смещения от нуля до 0,7–0,8 В значение ёмкости диода возрастает всего на 15–20%. При этом величина тока, протекающего через диод, не превышает нескольких десятков микроампер. Исходя из этих результатов, была предложена схема ограничителя (заявка на изобретение №2011102631 от 24.01.2011 г.), показанная на рис. 5, а. Фотография кристалла МИС представлена на рис. 5, б. Размер кристалла составляет 1,05×1,05×0,1 мм.

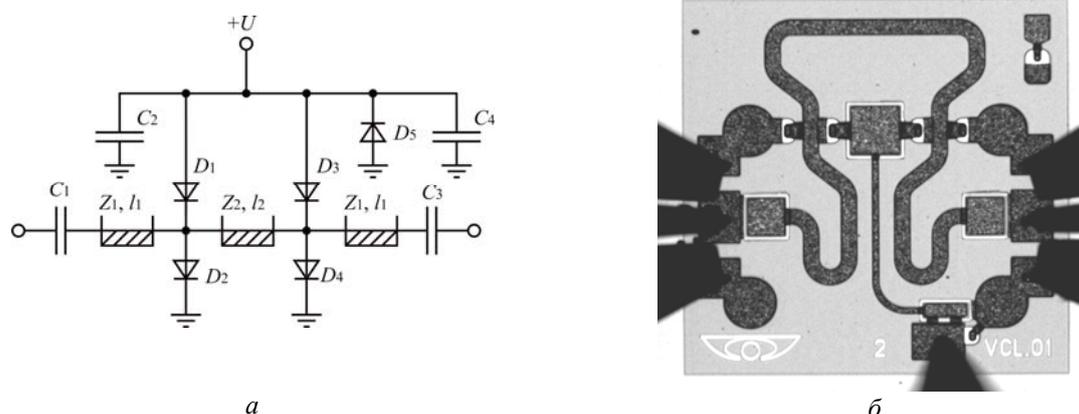


Рис. 5. Принципиальная схема (а) и фотография кристалла (б) ограничителя мощности, управляемого напряжением

Здесь группы входных и выходных диодов, соединенные отрезком микрополосковой линии, подключены через фильтры питания к источнику постоянного напряжения, смещающего их в прямом направлении до напряжений, меньших U_{on} . Наличие положительного смещения на диодах обеспечивает снижение амплитуды СВЧ-сигнала переключающего диод а, следовательно, и уменьшение уровня мощности, при котором начинается ограничение входного сигнала. Отличительной особенностью предложенной схемы является возможность управления уровнем просачивающейся мощности и вносимых потерь.

На рис. 6, а представлено семейство зависимостей вносимых и обратных потерь от частоты, измеренное при разных смещениях. Диапазон рабочих частот МИС составил 2–20 ГГц. Как следует из рис. 6, а, при увеличении смещения от нуля до 1,4 В (что соответствует 0,7 В на каждом диоде) происходит сравнительно слабое увеличение потерь (от 0,3 до 0,47 дБ на частоте 12 ГГц).

Измерения мощностных характеристик проводились на частоте 7 ГГц. Эксперимент показал (рис. 6, б), что при изменении управляющего напряжения от нуля до 1,4 В уровень просачивающейся мощности снижается от 17 до 8 дБм. Максимальная непрерывная входная мощность устройства составляет не менее 37 дБм. Представленная схема может быть также использована в качестве управляемого аттенюатора или «выключателя». Глубина изоляции МИС составляет не менее 40 дБ при управляющем токе 10 мА в X -диапазоне.

МИС ограничителя мощности на основе pin -диодов и диодов Шоттки. Монокристалльные интегральные схемы ограничителей СВЧ-мощности выполняются на pin -диодах или диодах с барьером

Шоттки (ДБШ). Оба класса схем имеют свои преимущества и недостатки: ограничители мощности на основе рpn-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 лучшим быстродействием. Все указанные преимущества можно объединить в многокаскадном защитном устройстве, содержащем рpn-диоды во входных каскадах и ДБШ на выходе [7].

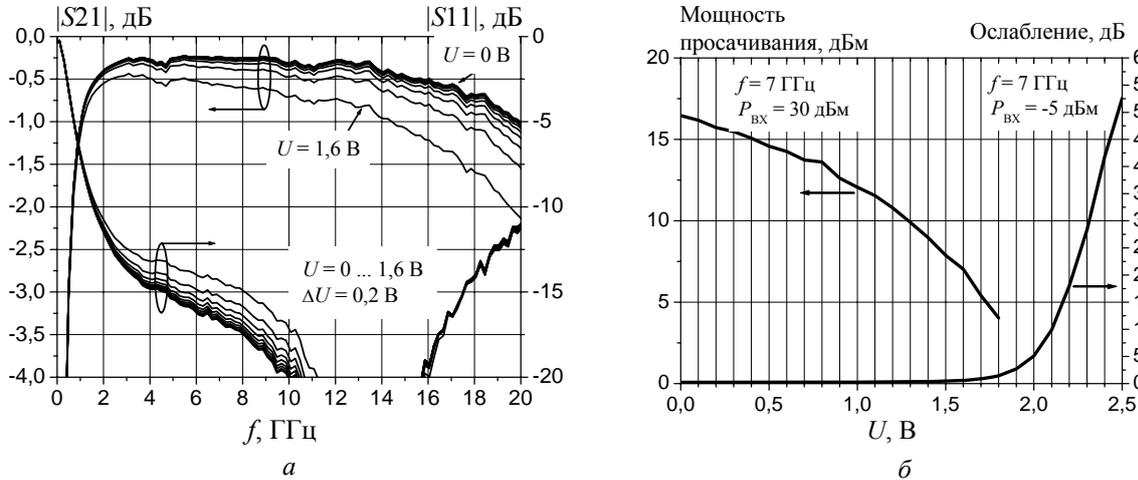
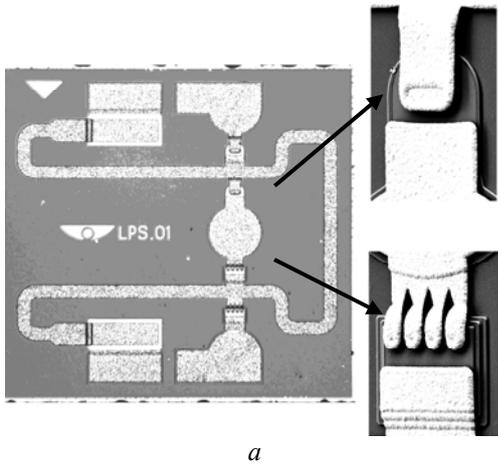


Рис. 6. Экспериментальные характеристики ограничителя мощности, управляемого напряжением: *a* – семейство АЧХ МИС ограничителя мощности при различных управляющих напряжениях; *б* – зависимости мощности просачивания и вносимых потерь от управляющего напряжения



В ОАО «НИИПП» была разработана двухкаскадная МИС ограничителя мощности, включающая рpn-диоды во входном каскаде и диоды Шоттки в выходном каскаде схемы (конструкция схемы защищена патентами РФ № 94765 от 27.05.2010 г. и № 102846 от 10.03.2011 г.). При изготовлении кристаллов схем к технологическим операциям создания рpn-диодных МИС, добавились операции, связанные с изготовлением вертикальных структур диодов Шоттки. Сложность изготовления данной схемы обусловлена не только большим количеством технологических операций, но и достаточно большим рельефом поверхности МИС (~ 4 мкм). Фотографии кристалла МИС и фрагментов рpn-диода и диода Шоттки представлены на рис. 7, *a*.

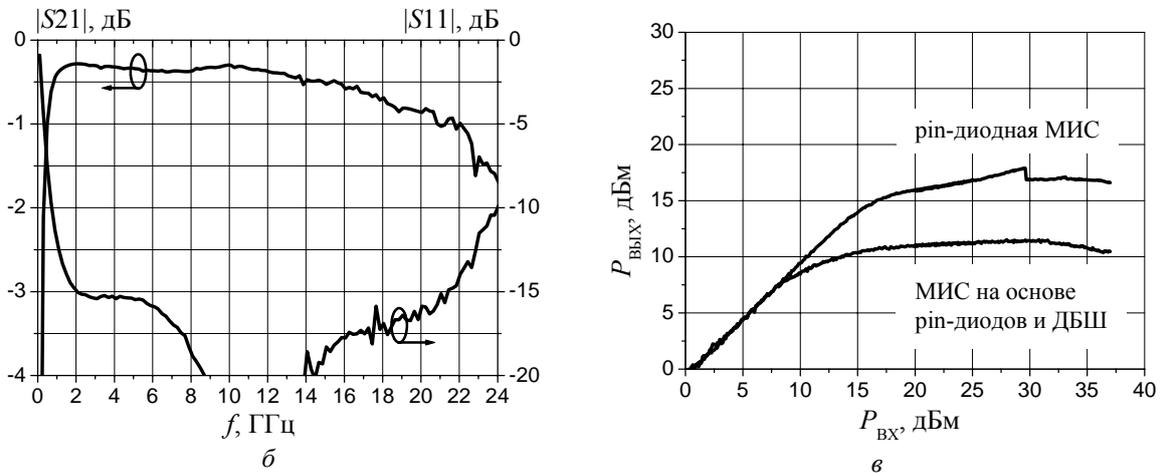
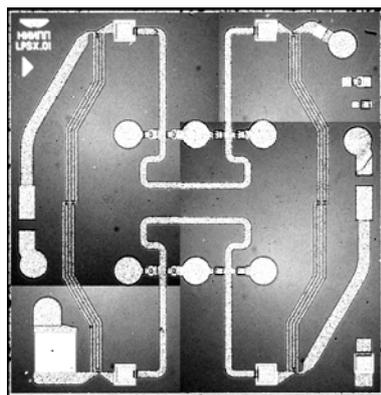


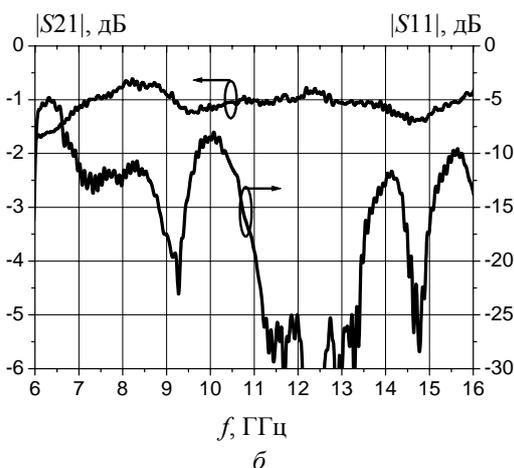
Рис. 7. Фотография кристалла защитного устройства (*a*) и его измеренные характеристики (*б, в*)



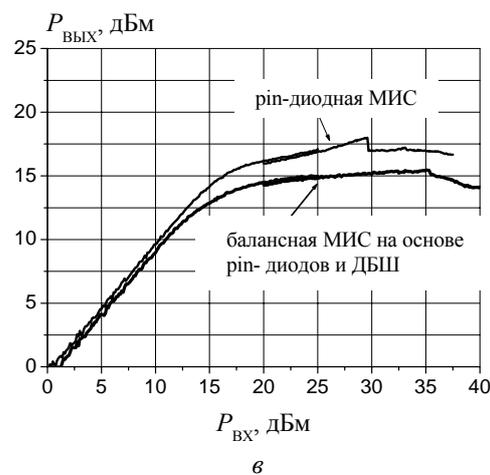
а

На рис. 7, б, в представлены измеренные АЧХ ($P_{\text{вх}} = -10$ дБм) и мощностная характеристика ($f = 7$ ГГц) схемы, соответственно. МИС характеризуется следующими параметрами: полоса рабочих частот 1–22 ГГц; вносимые потери не более 1 дБ; максимальная непрерывная входная мощность не менее 37 дБм (5 Вт); мощность просачивания не более 11,5 дБм (14 мВт).

Низкие значения вносимых потерь и просачивающейся мощности устройства дало возможность построения балансной схемы ограничителя мощности с использованием мостов Ланге (рис. 8). Основным преимуществом такой схемы является то, что СВЧ-мощность не отражается от входа устройства, а рассеивается в 50-омной нагрузке входного моста Ланге. Недостатками схемы являются более высокие вносимые потери и относительно узкая полоса рабочих частот, ограниченная свойствами мостов Ланге.



б



в

Рис. 8. Фотография кристалла балансного защитного устройства (а) и его измеренные характеристики (б, в)

Изготовленные МИС-балансных ограничителей мощности характеризуются следующими параметрами: полоса рабочих частот 7–16 ГГц; вносимые потери ~ 1 дБ; коэффициенты отражения на входе и выходе не более –10 дБ; максимальная входная мощность не менее 40 дБм (10 Вт); мощность просачивания не более 16 дБм (40 мВт).

Как видно из рис. 8, б, балансная схема характеризуется допустимым уровнем входной мощности не менее 40 дБм, что обусловлено наличием 3 дБ делителя мощности (мост Ланге) на входе схемы, т.е. на каждую отдельную схему приходится лишь половина входной мощности. Необходимо отметить, что созданная балансная МИС не имеет прямых аналогов.

Заключение. В ОАО «НИИПП» проведен комплекс работ, позволивший заложить основы нового для страны научно-технического направления по созданию СВЧ-монолитных интегральных схем 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.

Измерения малосигнальных параметров изготовленных МИС коммутаторов и ограничителей СВЧ-мощности проводились с помощью зондовой станции CASCADE Summit 11000 и векторного анализатора цепей R&S ZVA40 в НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУРа.

Литература

1. Сайт предприятия ООО «НПП ТЭЗ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nppteze.ru>, свободный (дата обращения: 05.09.2011).
2. Гетероструктурные pin-диоды / Г.И. Айзенштат, В.Г. Божков, А.Ю. Ющенко, Е.А. Монастырев // 20-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь). – Севастополь, 2010. – С. 169–170.

3. СВЧ pin-диоды на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs / Г.И. Айзенштат, В.Г. Божков, А.Ю. Ющенко и др. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – № 9/2. – С. 310–314.

4. Рекомбинация носителей заряда в арсенидгаллиевом pin-диоде / Г.И. Айзенштат, А.Ю. Ющенко, С.М. Гущин и др. // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, № 10. – С. 1407–1410.

5. Гетероструктурные монолитные интегральные схемы маломощного усилителя X-диапазона и pin-диодного ограничителя мощности / А.Ю. Ющенко, Г.И. Айзенштат, В.Г. Божков и др. // Московские чтения. Науч.-практ. конф. по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники (Москва). – 2011. – С. 26–27.

6. Carrol James M. Performance Comparison of Single and Dual Stage MMIC Limiters // IEEE MTT-S Digest. – 2001. – P. 1341–1344.

7. A Novel Analysis of a Ku-Band Planar pin-Diode Limiter / Seong-Sik Yang, Tak-Young Kim, Deok-Kyu Kong, et al // IEEE MTT-S Digest. – 2009. – Vol. 57, № 6. – P. 1447-1460.

Ющенко Алексей Юрьевич

Аспирант каф. физэлектроники ТУСУРа, науч. сотрудник ОАО «НИИПП»

Тел.: (382-2) 48-82-48

Эл. почта: ayzen@mail.tomsknet.ru

Айзенштат Геннадий Исаакович

Д-р техн. наук, нач. лаб. ОАО «НИИПП»

Тел.: (382-2) 48-82-48

Эл. почта: ayzen@mail.tomsknet.ru

Монастырев Евгений Александрович

Нач. отд. ОАО «НИИПП»

Божков Владимир Григорьевич

Д-р техн. наук, проф., нач. отд. ОАО «НИИПП»

Yushenko A.Y., Ayzenshtat G.I., Monastirev E.A., Bozhkov V.G.

MMIC's broadband switches and limiters with heterostructured GaAs pin-diodes

In the article there are presented the designing results of AlGaAs/GaAs pin-diode switches and limiters.

Keywords: monolithic integrated circuit, microwave, pin-diode, switch, limiter.