

ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО НА GaAs ДЛЯ РАБОТЫ В X-ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

А.А.Семенова, М.Н.Петров*

PROTECTIVE DEVICE ON GaAs FOR OPERATION IN X-BAND FREQUENCIES

A.A.Semenova, M.N.Petrov*

ЗАО «Планета», Великий Новгород, alyonkasa@mail.ru*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Mikhail.Petrov@novsu.ru

Рассматриваются проблемы конструирования и технологии изготовления защитных устройств на базе СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), выполненных на GaAs. В процессе работы обоснован выбор элементной базы в виде рpn диодов и реализована технология их изготовления с помощью газофазной эпитаксии. Основная часть работы посвящена разработке технологии создания низкоомных и малоиндуктивных шин металлизации на базе сквозных металлизированных отверстий, соединяющих элементы на лицевой стороне интегральных схем с металлизацией обратной стороны. Особое внимание уделено проектированию оптимальных геометрических размеров проводящих линий МИС защитных устройств на базе требований по волновому сопротивлению и фазовому набегу. Полученные электрические параметры СВЧ МИС удовлетворяют функциональному назначению защитных устройств для частот 10 ГГц.

Ключевые слова: *арсенид галлия, защитное устройство, газофазная эпитаксия, рpn-структура, приборы импульсной и силовой электроники*

The article discusses the problems of design and manufacturing technology of protective devices based on microwave MIS, made on GaAs. In the process of work, the choice of the element base in the form of pin diodes is justified and the technology of their manufacture using gas-phase epitaxy is implemented. The main part of the work is devoted to the development of technology for creating low-resistance and low-inductance metallization buses based on through metalized via connecting elements on the front side of the IC with metallization of the reverse side. Particular attention is paid to the design of the optimal geometric dimensions of the conductive lines of the MIS memory based on the requirements for wave resistance and phase incursion. The obtained electrical parameters of the microwave MIS satisfy the functional purpose of the protective devices for frequencies of 10 GHz.

Keywords: *gallium arsenide; protective device; gas phase epitaxial growth; p-i-n-structure; pulsed power devices*

Введение

Использование СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), базирующихся на последних достижениях в области гетероструктурной электроники, обуславливает прогресс в разработке и освоении новейших технологий в системах связи и радиолокационных системах на основе приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток.

В настоящее время в ряде стран разработан и серийно выпускается широкий спектр СВЧ МИС на основе гетероструктур, предназначенных для построения указанных систем. Функциональный ряд этих МИС включает набор различных схем: маломощные усилители и усилители мощности, защитные устройства, коммутаторы, фазовращатели, аттенюаторы, смесители и генераторы.

Актуальность работ, связанных с разработкой элементной базы для СВЧ-модулей, продиктована острой необходимостью производства, как гражданской аппаратуры нового поколения, так и специальной техники оборонного комплекса страны.

В России работы по созданию серийных изделий этого ряда ведутся всего на нескольких предприятиях.

Данная работа посвящена разработке и изготовлению защитных устройств (ЗУ). Такие устройства применяются, как правило, в составе приёмных трактов радиоаппаратуры, где они предотвращают появление на входных усилительных каскадах запре-

дельных уровней мощности как от внешних источников (наведённых помех), так и от собственного передатчика [1].

При разработке GaAs МИС ЗУ возникает ряд взаимосвязанных задач по изготовлению полупроводниковой структуры с требуемыми параметрами, построения технологического маршрута и топологии схемы. В предлагаемом докладе приводятся результаты собственной разработки.

Анализ возможных вариантов реализации ЗУ

Существует несколько видов защитных устройств: резонансные разрядники, полупроводниковые ЗУ. Полупроводниковые в свою очередь подразделяются на ограничители и выключатели. Также выделяют ферритовые диодные устройства, гибридные ЗУ, ЗУ на основе СВЧ-транзисторов, а также ЗУ на основе ударной и фотоионизации.

Согласно своему назначению, ЗУ должны функционировать в двух режимах работы — в режиме пропускания (низкого уровня мощности (НУМ)) и в режиме ограничения (высокого уровня мощности (ВУМ)) [2]. В первом режиме, характеризующемся безопасными для аппаратуры уровнями входной мощности, ЗУ должно вносить минимальные потери и искажения в проходящий сигнал. В режиме ВУМ при возникновении риска повреждения усилительных каскадов устройство должно переходить или переводиться управляющим сигналом в режим ограничения проходящей мощности. Первый вариант реализации

ЗУ относится к разряду автономных, а второй — к разряду управляемых.

Управляемые ЗУ по совокупности параметров превосходят автономные, однако ввиду специфики функционирования применяются только для защиты от детерминированных источников ВУМ, например, от сигнала собственного передатчика. Автономные ЗУ не требуют внешнего управления и часто не требуют и питания, защищая последующие каскады от любых источников ВУМ.

Автономные ЗУ малой и средней мощности сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн реализуются, как правило, в виде интегральных схем малой степени интеграции (МИС) на арсениде галлия. В них в качестве нелинейного элемента используется выпрямляющий контакт полупроводника электронного типа проводимости с металлом (диод Шоттки) или с полупроводником дырочного типа проводимости (рпн-диод) [3]. Конструктивно такие ЗУ представляют собой одну или несколько секций СВЧ линии передачи, шунтированных на корпус посредством одной или нескольких групп рпн-диодов и/или диодов Шоттки.

В такой схеме в режиме низкого уровня мощности диоды работают при околонулевом смещении, характеризуются высоким импедансом (закрыты) и могут быть представлены как высокодобротные конденсаторы. Микрополосковая линия согласована в рабочем диапазоне частот с учётом ёмкости этих конденсаторов, вследствие чего устройство в режиме низкого уровня мощности обеспечивает низкий уровень вносимых потерь и хорошее согласование с 50-омным трактом.

В режиме высокого уровня мощности при напряжении входного СВЧ сигнала выше определённого уровня диоды переводят в низкоимпедансное («открытое») состояние, в котором они могут быть представлены низкоомными резисторами ($R \approx 1 \dots 10$ Ом). Ограничение мощности при этом достигается двумя путями:

— Изменение импеданса диодов приводит к рассогласованию линии передачи с трактом, и существенная часть мощности (до 80%) отражается от входа и выхода ЗУ.

— Имеет место рассеивание проходящей мощности на корпус через шунтирующие линию передачи «открытые» диоды.

Сопротивление «открытого» диода является определяющим фактором его эффективности в режиме ограничения мощности. Чем выше это сопротивление, тем меньше рассогласование линии передачи (микрополоска (W)) с трактом, и тем большая доля мощности рассеивается на «открытых» диодах и просачивается на выход. Кроме того, даже без учёта повышения рассеиваемой мощности в соответствии с законом Джоуля—Ленца увеличивается тепловая нагрузка на «открытые» диоды. Таким образом, имеет место существенное снижение предельно допустимой входной мощности при, казалось бы, незначительном увеличении сопротивления базы диода. Второй негативный аспект высокого сопротивления «открытого» диода, частично являющийся следствием первого, — высокая просачивающаяся мощность.

Выбор элементной базы для реализации защитного устройства

В качестве диодов для построения ЗУ наибольшее применение находят два типа приборов: диоды Шоттки и рпн-диоды. Применение каждого из них имеет свои плюсы и минусы, что связано с различием их параметров.

При проведении сравнительного анализа эффективности применения ЗУ на основе диодов Шоттки и рпн-диодов был выявлен один существенный недостаток диодов Шоттки — их высокая электрическая ёмкость. Это связано с тем, что для реализации устойчивости ЗУ к уровню входной СВЧ мощности в несколько ватт и выше требуется применение диодов Шоттки большой площади (ёмкости), что затрудняет согласование их с линией передачи в X-диапазоне даже в узких диапазонах частот. В этом случае применение рпн-диодов с меньшей на два порядка электрической ёмкостью, по крайней мере, в качестве входных каскадов ограничения, не имеет альтернативы.

Конструкция и технология изготовления рпн-диодов

В составе данного ЗУ применяется планарная конструкция рпн-диодов, схематично представленная на рис.1. При подаче прямого смещения из p^+ - и n^+ -областей в i -область инжектируются неосновные носители заряда, и диодная структура переходит в низкоимпедансное состояние. По сравнению с диодом на p - n переходе рпн-диод имеет более высокие геометрические размеры тепловыделяющей части этого «низкоомного резистора», что обеспечивает его большую максимальную рассеиваемую мощность. При подаче обратного смещения i -область полностью обедняется носителями заряда, и диодная структура переходит в высокоимпедансное состояние. По сути, она превращается в плоский конденсатор, в котором роль диэлектрика играет i -область. Протяжённость i -области задается конструктивно и для СВЧ диодов на арсениде галлия, как правило, лежит в диапазоне $1 \dots 10$ мкм, что обеспечивает на один-два порядка меньшую ёмкость и большую добротность, т.к. у диода на p - n переходе (как и у диода Шоттки) толщина обеднённой области не превышает $0,1 \dots 0,5$ мкм. Кроме того, при изменении прикладываемого напряжения толщина обеднённой области рпн-диода практически не модулируется, поэтому его ёмкость остается практически постоянной, что повышает линейность динамических характеристик.

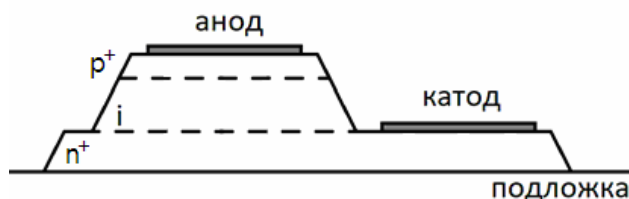


Рис.1. Конструкция планарного рпн-диода в разрезе

Рпн-структура формируется методом хлоридной газофазной эпитаксии на подложке из полупро-

лирующего GaAs последовательным наращиванием трех слоев:

- p^+ -GaAs:Te с концентрацией носителей $p > 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$,
- i -GaAs на базе слаболегированного p -GaAs с концентрацией носителей $< 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$,
- n^+ -GaAs:Si с концентрацией носителей $n > 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Затем с помощью травления создается мезоструктура, показанная на рис.1.

Выбор толщины i -области pin диода, используемого в составе ЗУ, является компромиссным решением: с одной стороны, она должна быть достаточно большой, чтобы минимизировать ёмкость между трактом и корпусом, что необходимо для снижения вносимых потерь и расширения рабочей полосы. С другой стороны увеличение толщины i -слоя приводит к снижению максимально допустимой входной мощности и росту просачивающейся мощности. Кроме того, существуют технологические ограничения как при создании эпитаксиальных структур, так и при изготовлении МИС. Для реализации ЗУ средней мощности X -диапазона предпочтительная толщина i -области лежит в пределах 2 ... 4 мкм. При разработке данного ЗУ использовались эпитаксиальные структуры с толщиной i -слоя 2 мкм.

Схемная реализация защитного устройства

В процессе выполнения данной работы разработана принципиальная электрическая схема МИС ЗУ, приведенная на рис.2. Она содержит два каскада встречно включённых диодов, шунтирующих согласованную линию передачи на корпус. Таким образом, в состав схемы входят диоды, элементы соединения их с корпусом (сквозные отверстия) и проводящие линии.

Особенности реализации низкоомных соединительных проводников

Создание МИС ЗУ сантиметрового и тем более миллиметрового диапазона длин волн невозможно без применения специальных низкоомных и низкоиндуктивных средств соединения элементов электрической схемы с корпусом. Это связано с тем, что применение традиционных металлических шин приводит к деградации параметров ЗУ X -диапазона при работе в режиме высокого уровня мощности, что наглядно подтверждает простой расчёт. Так, индуктивность проволочного вывода длиной 0,5 мм составляет $\sim 0,3 \text{ нГн}$, трёх таких выводов — $0,1 \text{ нГн}$. В результате их реактивное сопротивление на частоте 10 ГГц в последнем случае составит 6,3 Ом. Иначе говоря, применение трёх 0,5-

миллиметровых проволочных выводов для соединения с корпусом эквивалентно увеличению сопротивления диода в «открытом» состоянии с 3...5 до 9...11 Ом, т.е. более чем вдвое.

Единственный приемлемый способ соединения с корпусом в данном случае — использование сквозных металлизированных отверстий, соединяющих элементы на лицевой стороне МИС с металлизацией обратной стороны. Индуктивность металлизированного сквозного отверстия в кристалле МИС толщиной 100 мкм составляет около 0,02 нГн, активное сопротивление — 0,2 Ом, т. е. импеданс такого соединения с корпусом составит 1,2—1,3 Ом на частоте 10 ГГц.

Исходя из изложенного, также видно, что общая длина пути сигнала от линии передачи через «открытый» pin -диод до корпуса в режиме высокого уровня мощности должна быть минимальной. Так, каждые дополнительные 50 мкм ее длины увеличивают импеданс этого пути (фактически сопротивление диода в «открытом» состоянии) на частоте 10 ГГц на величину 1 Ом.

Проводящие линии в составе МИС ЗУ выполняют две функции: основную — передачу СВЧ сигнала с входа на выход в режиме низкого уровня мощности или на корпус в режиме высокого уровня мощности, и дополнительную — отвод тепла от тепловыделяющих элементов (pin -диодов) в режиме ВУМ. С точки зрения передачи СВЧ сигнала основным параметром проводящей линии ЗУ является малое эффективное электрическое сопротивление, определяемое её длиной, шириной, параметрами материала и толщиной (влиянием скин-эффекта).

Геометрия проводящих линий МИС ЗУ разрабатывается на базе требований по волновому сопротивлению и фазовому набегу линий передачи, кроме того, выдвигается дополнительное требование к ширине (поперечному сечению) дорожки, связанное с необходимостью выдерживать протекание большого тока, возможно, длительное время, в режиме ВУМ. В связи с последним требованием на основе накопленного на предприятии опыта по разработке и производству МИС определено следующее ограничение: действующее значение переменного тока не должно превышать 30 мА на 1 мкм ширины проводящей линии толщиной 2 мкм, сформированной методом гальванического золочения. Оценочные расчёты показывают, что действующее значение переменного тока на входной секции линии передачи разрабатываемого ЗУ (элемент W1.1 на рис.2) при входной мощности 5 Вт составляет 540 мА, т. е. минимальная ширина линии должна быть порядка 18 мкм. С практической точки зрения целесообразно принять ширину входных сек-

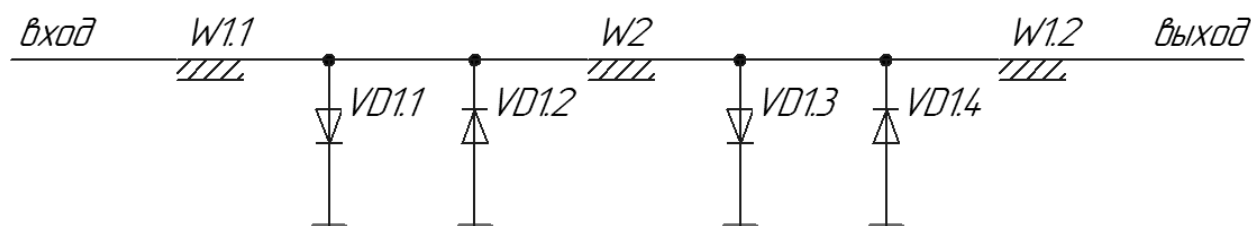


Рис.2. Принципиальная электрическая схема МИС ЗУ

ций линии передачи ЗУ равной 24 мкм. Требования к остальным проводящим линиям ЗУ существенно менее жесткие — для них ширина, как правило, определяется возможностями технологического процесса производства МИС.

Заключение

В процессе выполнения данной работы разработано ЗУ со следующими параметрами:

- диапазон частот 9,5-10,5 ГГц;
- вносимые потери не более 0,5 дБ;
- максимальная непрерывная входная мощность 37 дБм.

Полученные параметры ЗУ сопоставимы с параметрами зарубежных аналогов.

1. Ропий А.И., Старик А.М., Шутов К.К. Сверхвысокочастотные защитные устройства. М.: Радио и связь, 1993. 128 с.
2. Добуш И.М. Обзор способов построения схем СВЧ монолитных ограничителей мощности // Доклады Томского

гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2010. №2(22). С.44-48.

3. Ющенко А.Ю., Айзенштат Г.И., Монастырев Е.А., Божков В.Г. СВЧ-монолитные интегральные схемы широкополосных коммутаторов и ограничителей мощности на основе гетероструктурных арсенидгаллиевых pin-диодов // Доклады Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2011. №2(24). С.10-16.

References

1. Ropiy A.I., Starik A.M., Shutov K.K. Sverkhvysokochastotnyye zashchitnyye ustroystva. [EHF protection devices]. Moscow, Radio i svjaz Publ., 1993. 128 p.
2. Dobush I.M. Obzor sposobov postroyeniya skhem SVCH monolitnykh ogranichiteley moshchnosti [Review of designing principles and circuitry of MMIC limiters]. Doklady Tomskogo gos. un-ta sistem upravleniya i radioelektroniki. 2010, no.2(22), pp.44-48.
3. Yushchenko A.Yu., Ayzenshtat G.I., Monastyrev E.A., Bozhkov V.G. SVCH-monolitnyye integral'nyye skhemy shirokopolosnykh kommutatorov i ogranichiteley moshchnosti na osnove geterostrukturnykh arsenidgalliyevykh pin-diodes [MMIC's Broadband switches and limiters with heterostructured GaAs pin-diodes]. Doklady Tomskogo gos. un-ta sistem upravleniya i radioelektroniki. 2011. no. 2(24), pp.10-16..