

УДК 621.382.2/3

В.А. Гущин, И.В. Юнусов, А.Ю. Плотникова

СВЧ МИС на основе GaAs-pin-диодов для управления амплитудой сигнала в диапазоне частот 4–27 ГГц

Приведены результаты разработки серии сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем (СВЧ МИС) на основе GaAs-pin-диодов с интегрированными цепями управления, предназначенных для управления амплитудой сигнала в диапазоне частот (4–27) ГГц. Разработанные МИС характеризуются низкими вносимыми и обратными потерями СВЧ-сигнала, и могут успешно применяться в составе измерительной техники СВЧ.

Ключевые слова: монолитные интегральные схемы, СВЧ, арсенид галлия, pin-диод, коммутатор, аттенюатор, модулятор, интегрированные цепи управления.

Монолитные интегральные схемы (МИС) на основе GaAs широко используются в составе аппаратуры СВЧ различного назначения. В частности, в измерительной технике замена блоков, реализуемых в виде гибридных интегральных схем, на МИС аналогичного функционального назначения направлена на расширение рабочего диапазона частот, снижение вносимых потерь сигнала и уровня шума, значительное ускорение сборки и настройки. Использование МИС позволяет повысить технические параметры аппаратуры СВЧ при снижении ее стоимости.

Как правило, при создании измерительной аппаратуры СВЧ-производители вынуждены ориентироваться на представленную на рынке номенклатуру СВЧ МИС, однако нередко возникают технико-экономические задачи, оптимальное решение которых связано с необходимостью разработки собственных МИС, удовлетворяющих специальным требованиям.

Одним из базовых элементов в векторном анализаторе цепей являются схемы управления амплитудой СВЧ-сигнала: коммутаторы, модуляторы, аттенюаторы. Для реализации МИС данного функционального назначения на сегодняшний день существуют две основные технологии: на основе pin-диодов и на основе полевых транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ). Нередко обе технологии взаимно дополняют друг друга в одной и той же системе: в нижнем диапазоне частот используются МИС на основе ПТШ, в верхнем диапазоне частот – МИС на основе pin-диодов. Pin-диоды обладают более низкой емкостью и меньшим сопротивлением потерь по сравнению с ПТШ, т.е. обладают более высоким коммутационным качеством и способны эффективно функционировать при значительно больших частотах. К преимуществам pin-диода также относятся простая технология изготовления, не критичная к операциям литографии, и более высокая максимально допустимая входная мощность.

В настоящей работе приведены результаты разработки СВЧ МИС коммутаторов 1×2 и 1×3 канала, модулятора с фильтром верхних частот (ФВЧ) и аттенюатора для применения в диапазоне частот (4–27) ГГц. МИС выполнены с интегрированными цепями управления (ЦУ), при этом реализован способ расширения частотного диапазона МИС с встроенными ЦУ.

Технология изготовления МИС. МИС изготовлены на основе технологии гетероструктурных AlGaAs/GaAs квазивертикальных pin-диодов, разработанной в ЗАО «НПФ «Микран» [2]: на полупроводниковой подложке с выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии p^+i-n^+ -структурой последовательно выполняются следующие операции: формирование несплавного омического контакта к слою p^+ -GaAs, жидкостное химическое травление слоев p^+ -GaAs и i -GaAs, формирование сплавленного омического контакта к n^+ -GaAs; локальная пассивация периферии i -слоя нитридом кремния; жидкостное травление n^+ -GaAs для межэлементной изоляции; гальваническое осаждение Au для формирования металлической разводки и воздушных мостов; финишная пассивация диэлектрическим покрытием; утонение пластины; травление сквозных отверстий в GaAs; металлизация обратной стороны пластины гальваническим осаждением Au. Технология включает также блоки формирования тонкопленочных резисторов, тонкопленочных конденсаторов и защиту МИС полимерным покрытием.

Интегрированные цепи управления МИС. Основная техническая проблема при использовании pin-диодных СВЧ МИС – необходимость применения инжекторов питания для разделения СВЧ-

сигнала и управляющего низкочастотного сигнала, обладающих приемлемыми параметрами в широком частотном диапазоне. Существуют ограничения по диапазону частот для интегрального исполнения инжекторов питания в виде фильтра нижних частот (ФНЧ), обусловленные применением в них интегральных катушек индуктивности. Для работы в широком диапазоне частот катушка индуктивности должна удовлетворять противоречивым требованиям: с одной стороны, необходимо иметь максимальную индуктивность, что определяет нижнюю частотную границу и подразумевает использование максимального количества витков при минимальном расстоянии между ними, а с другой стороны, необходимо минимизировать суммарную емкость между витками катушки, что определяет верхнюю частотную границу функционирования. В качестве одного из решений был исследован вариант с изготовлением катушки индуктивности в виде последовательности воздушных мостиков для снижения емкости между витками.

На рис. 1 приведены микроскопические изображения тестовых катушек индуктивности одинаковой топологии, выполненных по стандартной технологии и в виде воздушных мостиков. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) S -параметров тестовых катушек, включенных в схему согласно рис. 2, приведены на рис. 3: кривые 2 и 3 соответствуют $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$ для катушки, выполненной по стандартной технологии, а кривые 1 и 4 соответствуют $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$ для катушки, выполненной в виде воздушных мостиков.

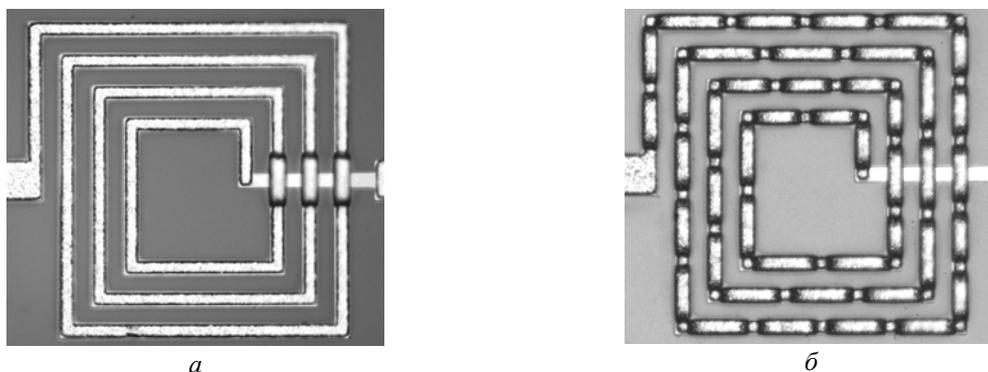


Рис. 1. Микроскопические изображения катушек индуктивности: *а* – выполненной по стандартной технологии; *б* – выполненной в виде воздушных мостиков

Как видно из рис. 3, без каких-либо изменений в стандартной технологии изготовления был расширен верх рабочий диапазон частот интегрированного инжектора питания на 2–3 ГГц.

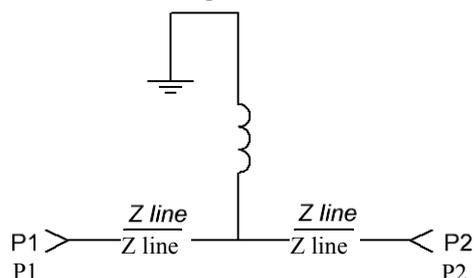


Рис. 2. Схема включения катушки индуктивности

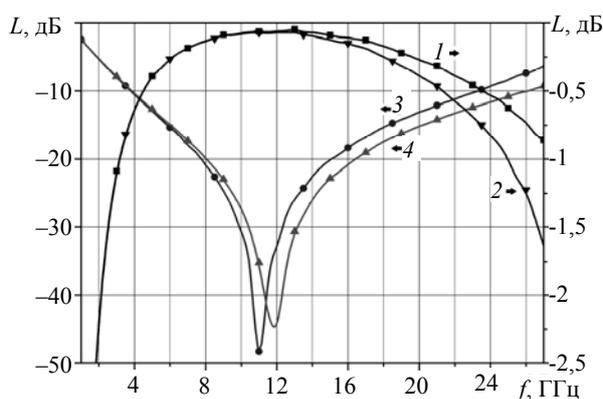


Рис. 3. АЧХ S -параметров устройства по схеме рис. 2 с различными катушками индуктивности

Данный результат использован при проектировании и изготовлении приборов, описанных ниже.

СВЧ МИС коммутаторов 1×2 и 1×3 канала. СВЧ-коммутаторы 1×2 и 1×3 канала (рис. 5 и 7) предназначены для соединения по СВЧ-сигналу входа и одного из двух (трех) выходов, обеспечивая между ними малые вносимые потери, при этом между входом и остальными выходами обеспечивается максимальная изоляция [1]. Часть топологий МИС закрыта, т.к. содержит pin-диоды с рядом конструктивных особенностей, не подлежащих разглашению. Эквивалентные низкочастотные (НЧ) схемы МИС коммутаторов (рис. 4 и 6) представляют собой последовательно-параллельное включение pin-диодов в каждом выходном канале, а также ЦУ в виде фильтра нижних частот (ФНЧ), со-

стоящего из катушки индуктивности и конденсатора [3]. На всех СВЧ-входах МИС установлены разделительные конденсаторы. Управление состоянием каналов («открыто»/«закрыто») осуществляется постоянным током ± 10 мА.

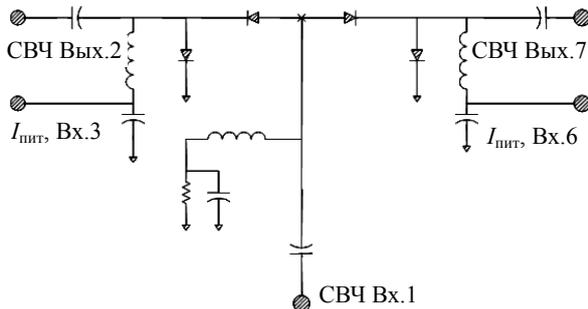


Рис. 4. Эквивалентная НЧ схема коммутатора 1×2 канала

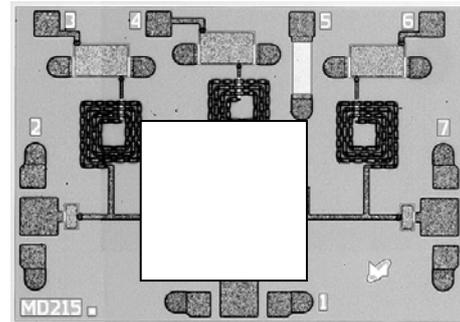


Рис. 5. Микроскопическое изображение коммутатора 1×2 канала

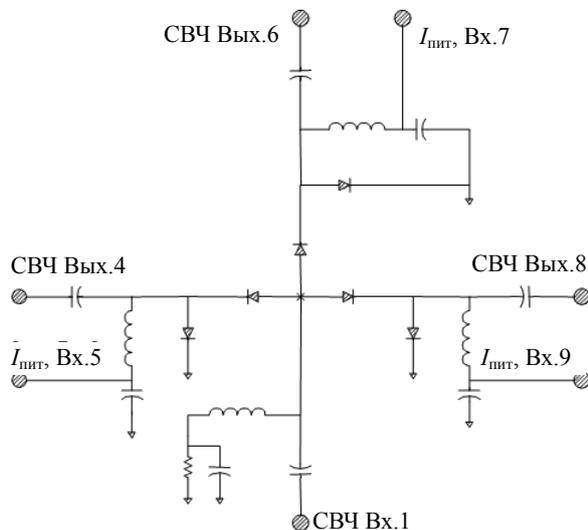


Рис. 6. Эквивалентная НЧ-схема коммутатора 1×3 канала

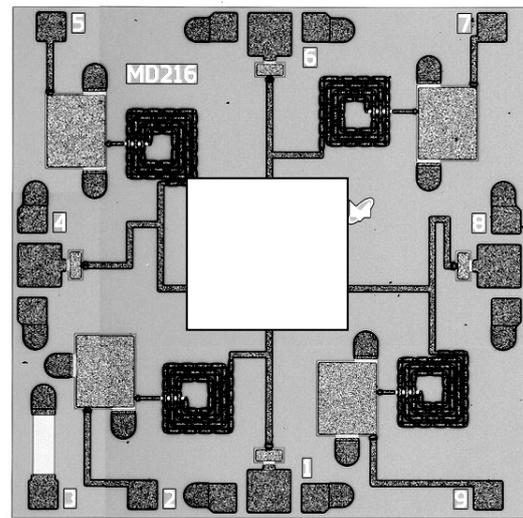


Рис. 7. Микрофотография топологии коммутатора 1×3 канала

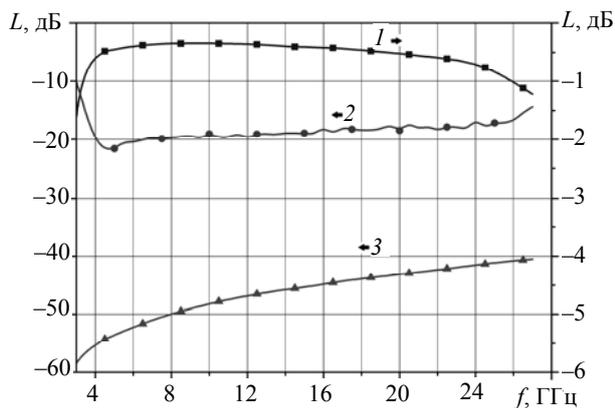


Рис. 8. Измеренные АЧХ S-параметров коммутатора 1×2 канала

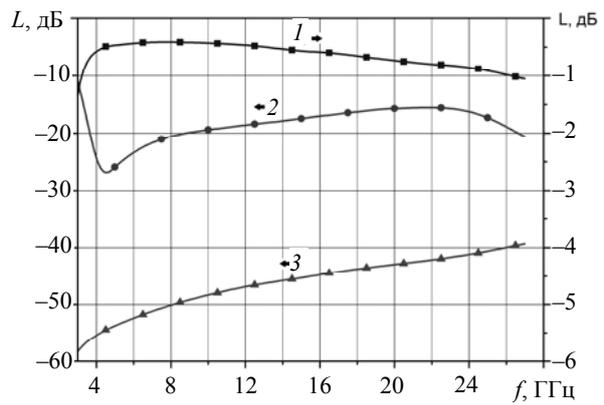


Рис. 9. Измеренные АЧХ S-параметров коммутатора 1×3 канала

Измеренные АЧХ S-параметров МИС коммутаторов в диапазоне частот (4–27) ГГц приведены на рис. 8 и 9: кривые 1 соответствуют вносимым потерям открытых каналов, кривые 2 – возвратным потерям по входу и выходу открытого канала, кривые 3 – изоляции закрытых каналов коммутаторов. Отечественных аналогов данных МИС не представлено, ближайшие аналоги – MA4SW210B и MA4SW310B фирмы M/A-COM (США).

Особенностью схем является возможность использования встроенного либо подключение внешнего токозадающего резистора в ЦУ СВЧ-входа МИС. Контактные площадки спроектированы с учетом способа монтажа МИС.

СВЧ МИС аттенюатора и СВЧ МИС модулятора с ФВЧ. Аттенюатор предназначен для управления в широком диапазоне амплитудой проходящего СВЧ-сигнала в зависимости от величины управляющего тока, при этом варьирование мощности на выходе аттенюатора происходит за счет поглощения мощности активными сопротивлениями pin-диодов и за счет отражения сигнала [1].

Эквивалентная НЧ-схема pin-диодного аттенюатора представляет собой подключенные параллельно СВЧ-тракту pin-диоды, а также ЦУ в виде фильтра нижних частот (ФНЧ), состоящего из катушки индуктивности и конденсатора, а также разделительные конденсаторы на СВЧ-входах устройства (рис. 12). СВЧ МИС модулятора (рис. 11) аналогична схеме аттенюатора (рис. 10), но содержит в СВЧ-тракте ФВЧ для предотвращения распространения частоты управляющего сигнала. ФВЧ выполнен в виде трех конденсаторов и трех катушек индуктивности (рис. 13).

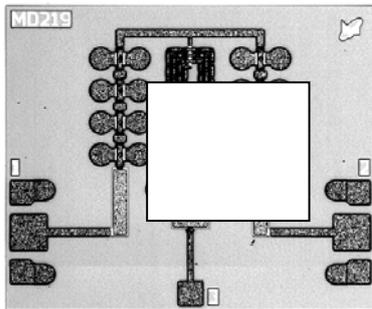


Рис. 10. Микроскопическое изображение МИС-аттенюатора

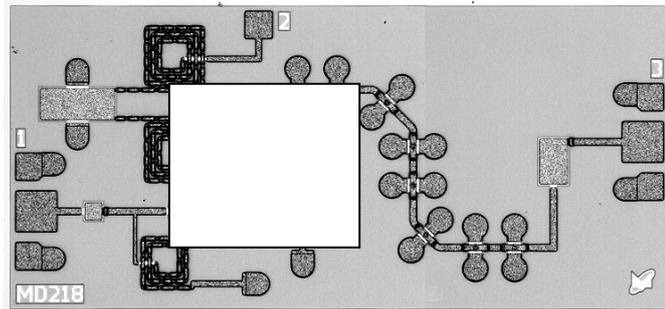


Рис. 11. Микроскопическое изображение МИС-модулятора

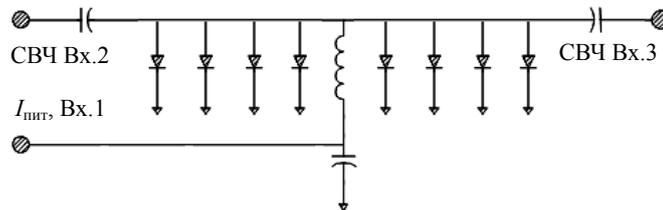


Рис. 12. Эквивалентная НЧ схема аттенюатора

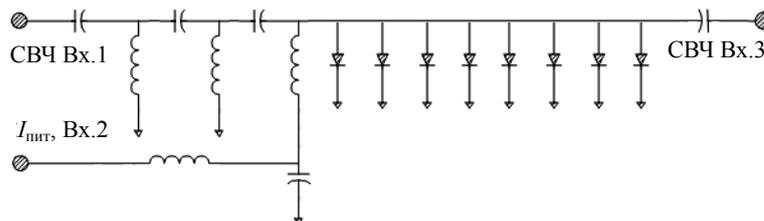


Рис. 13. Эквивалентная НЧ-схема модулятора

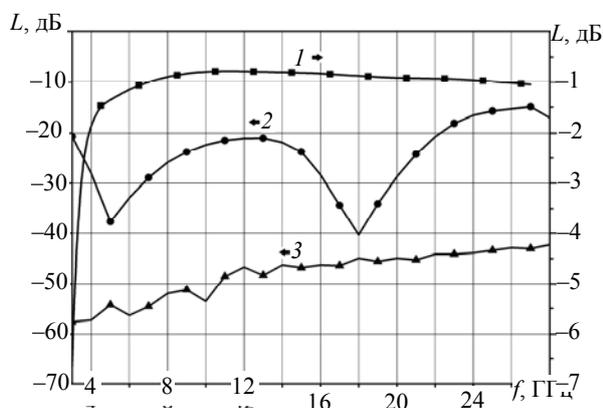


Рис. 14. Измеренные АЧХ S-параметров аттенюатора

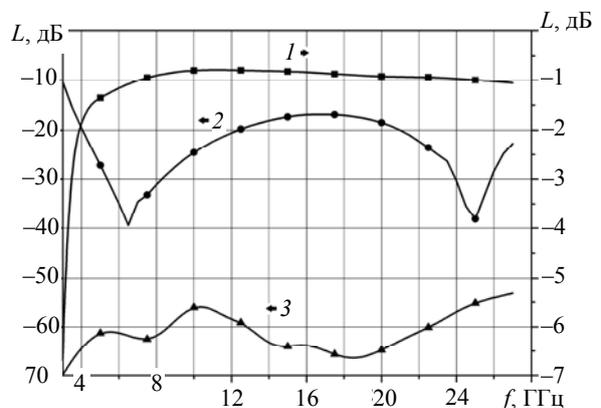


Рис. 15. Измеренные АЧХ S-параметров модулятора

Измеренные АЧХ S -параметров МИС аттенюатора и МИС модулятора в диапазоне частот (4–27) ГГц приведены на рис. 14 и 15 соответственно. Кривые 1 соответствуют вносимым потерям МИС при $I_{\text{упр}} = 0$ мА, кривые 2 – возвратным потерям по входу модулятора и аттенюатора при $I_{\text{упр}} = 0$ мА, кривые 3 – вносимым потерям МИС при $I_{\text{упр}} = 10$ мА.

Заключение. Разработан ряд СВЧ МИС для управления амплитудой сигнала, который включает коммутаторы 1×2 и 1×3 канала, модулятор и аттенюатор для применения в диапазоне частот (4–27) ГГц. Изготовленные микросхемы обладают сравнительно хорошими СВЧ-параметрами и могут успешно применяться при создании СВЧ-измерительной аппаратуры и других СВЧ-систем, позволяя провести замещение зарубежных СВЧ МИС аналогичного функционального назначения. Исползованные при проектировании схемотехнические и конструктивные решения позволили без усложнения технологии производства расширить рабочий диапазон СВЧ МИС.

Литература

1. Веселов Г.И. Микроэлектронные устройства СВЧ: учеб. пособие для радиотехнических специальностей вузов / Г.И. Веселов, Е.Н. Егоров, Ю.Н. Алехин. – М.: Высш. шк., 1988. – 280 с.
2. Монолитные интегральные схемы GaAs-pin-диодных коммутаторов СВЧ / И.В. Юнусов, А.М. Ющенко, А.Ю. Плотникова и др. // Сб. докл. Всерос. конф. «Микроэлектроника СВЧ». – СПб., 2012. – С. 93–96.
3. Хижа Г.С. СВЧ-фазовращатели и переключатели: Особенности создания на pin-диодах в интегральном исполнении / Г.С. Хижа, И.Б. Вендик, Е.А. Серебрякова. – М.: Радио и связь, 1984. – 184 с.
4. RFIC and MMIC design and technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.globalspec.com/reference/25581/203279/rfic-and-mmich-design-and-technology>, свободный (дата обращения: 12.04.2014).

Гущин Владимир Александрович

Студент 2-го курса магистратуры каф. физической электроники ТУСУРа
инженер-технолог НПКМ ЗАО «НПФ «Микран»
Тел.: +7-923-403-26-96
Эл. почта: vovan545182@gmail.com

Юнусов Игорь Владимирович

Начальник лаборатории диодных МИС НПКМ ЗАО «НПФ «Микран», г. Томск
Тел.: +7-952-890-98-01
Эл. почта: yunusov@micran.ru

Плотникова Александра Юрьевна

Инженер-технолог НПКМ ЗАО «НПФ «Микран»
Тел.: +7-923-402-39-60
Эл. почта: alp1@micran.ru

Gushchin V.A., Yunusov I.V., Plotnikova A.Y.

Control MMICs based on GaAs

The article describes pin-diode-based GaAs MMICs design results. MMICs are designed for using in frequency range (4–27) GHz, first of all in microwave measuring equipment. Measured characteristics show that produced MMICs can control a RF signal without adding significant insertion losses and reflections from device's input.

Keywords: monolithic microwave integrated circuit, gallium arsenide, pin diode, SPDT switch, SP3T switch, attenuator, modulator, integrated bias network.