

КВАЗИМОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СВЧ-СХЕМЫ: ТЕХНОЛОГИЯ И ПРИБОРЫ

Устройства СВЧ-электроники широко используются в системах радиолокации и беспроводной связи, спутникового и кабельного телевидения. Сфера их применения непрерывно расширяется, и мировой рынок СВЧ-электроники растет на протяжении последних 10 лет. Одним из наиболее емких является рынок устройств мощной СВЧ-электроники. В большинстве систем мощной СВЧ-электроники используются устройства на основе вакуумных ламп. Однако перспективы этого направления связаны с прогрессом в развитии твердотельных устройств на основе полупроводников, которые более эффективны, компактны, надежны и дешевы в изготовлении. Кроме того, твердотельные устройства открывают новые возможности по созданию широко востребованных СВЧ-систем контроля работы двигателей, управления движением летательных аппаратов, систем предупреждения столкновений автомобилей и многих других.

ТЕХНОЛОГИИ СВЧ-МИКРОСХЕМ

Твердотельная СВЧ-электроника начала интенсивно развиваться с появлением кремниевых, а затем и арсенидгаллиевых СВЧ-транзисторов с приемлемыми параметрами по коэффициенту усиления, коэффициенту шума, КПД и выходной мощности в СВЧ-диапазоне. Большая номенклатура, многофункциональность, сложность реализации технических характеристик при небольшой потребности (в основном в военной технике) изначально направили развитие твердотельной СВЧ-электроники по пути гибридной технологии (технологии гибридных интегральных схем – ГИС). При этой технологии отдельные активные и пассивные компоненты – транзисторы, конденсаторы, линии задержки, ключи и т.п., изготовлен-

Ю.Мякишев, В.Гуляев, ОАО "Октава"
К.Журавлев,
ИФП СО РАН

ные из оптимальных материалов и по оптимальной для каждого компонента технологии, объединяются в ГИС. Гибридная технология на первых этапах развития твердотельной СВЧ-электроники за счет несложных технологических приемов – разварки, пайки, склеивания – при резком увеличении функциональных возможностей СВЧ-аппаратуры обеспечила высокие технические характеристики, приемлемую надежность, резкое снижение веса и габаритов и низкую цену аппаратуры за счет использования высокого качества компонентов, возможности подстройки в процессе изготовления ГИС.

С развитием технологии арсенида галлия появилась технология монолитных СВЧ-интегральных схем (МИС СВЧ), в которой активные и пассивные СВЧ-компоненты изготавливаются на одном кристалле и в едином технологическом цикле. Эта технология открыла перспективы создания более сложных, более высокочастотных СВЧ-систем с повышенной надежностью, меньшим весом и габаритами, в том числе наземных и бортовых систем радиолокации с активными фазированными решетками (АФАР).

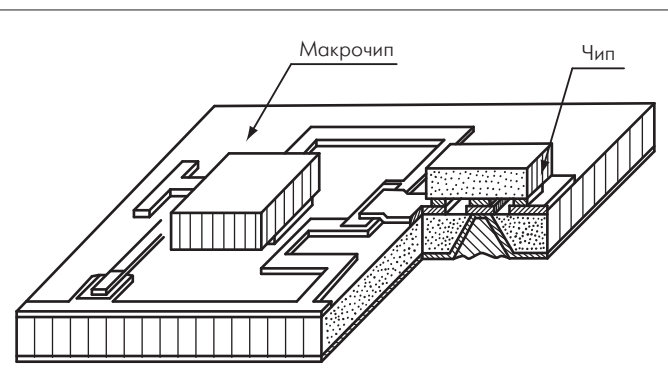


Рис. 1. Структура КМИС двухкаскадного усилителя мощности

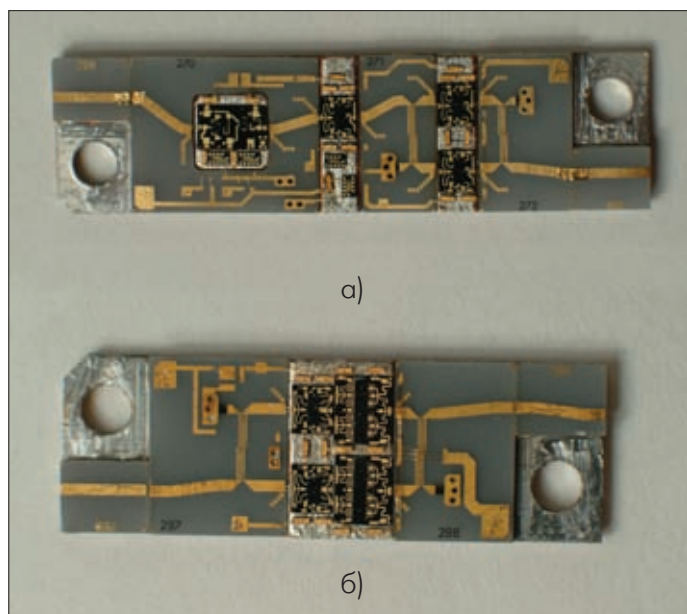


Рис.2. Усилитель мощности для систем с АФАР X-диапазона на КМИС:
а – предварительный УМ ($P_{\text{вых}} \geq 1,5 \text{ Вт}$, $K_p \geq 30 \text{ дБ}$, $\text{КПД} \geq 24\%$),
б – выходной УМ ($P_{\text{вых}} \geq 6 \text{ Вт}$, $K_p \geq 10 \text{ дБ}$, $\text{КПД} \geq 24\%$)

Очевидно, что преимущества технологии МИС реализуются только при массовой потребности в СВЧ-схемах, когда за счет снижения трудоемкости и повышения выхода годных схем удается достичь низкой стоимости интегральных СВЧ-схем и оправдать большие капитальные вложения в технологическое оборудование и инфраструктуру. Наиболее тяжело обеспечить высокий выход годных для СВЧ МИС усилителей мощности (УМ), технические трудности при изготовлении которых сопоставимы со СБИС на кремнии, потому что они содержат сложные в изготовлении мощные транзисторы с малой длиной (менее 0,5 мкм) и большой шириной (10–15 мм) затвора и множество различных пассивных элементов: емкостей, индуктивностей, воздушных мостиков и сквозных заземляющих отверстий. Площадь чипов УМ превышает 20 мм² при толщине менее 100 мкм. Стоимость МИС УМ высока также потому, что для обеспечения технических характеристик мощных транзисторов (выходной мощности, коэффициента усиления и КПД) их изготавливают на дорогих эпитаксиальных гетероструктурах, значительная часть пло-

щади которых (до 90%) тратится на создание пассивных компонентов.

При отсутствии массовой потребности в СВЧ-схемах наиболее целесообразна технология квазимонолитных СВЧ-интегральных схем (КМИС СВЧ), в которой оптимально сочетаются преимущества ГИС- и МИС-технологий. В ОАО "Октава" разработана и успешно используется технология КМИС для сантиметрового диапазона, в которой интегральная СВЧ-схема формируется из нескольких чипов арсенида галлия [1]. Чипы с полевыми субмикронными транзисторами устанавливаются перевернутым монтажом на макрочип с пассивными элементами и отрезками микрополосковых линий (рис.1). Под местом установки транзистора в макрочипе для эффективного отвода тепла формируют сквозные отверстия, заполненные металлом с высокой теплопроводностью.

Для примера, технические характеристики, надежность и габариты КМИС двухкаскадного УМ (см. рис. 1) такие же, как у аналогичной МИС УМ. Более низкая стоимость КМИС по сравнению с МИС достигается за счет изготовления макрочипов из пластин относительно дешевого объемного полупроводникового арсенида галлия и высокого выхода годных макрочипов, не содержащих элементы с субмикронными размерами. Кроме того, дорогие эпитаксиальные гетероструктуры расходуются только на изготовление чипов транзисторов. В результате выход годных КМИС получается в несколько раз выше, чем для МИС, а трудоемкость их изготовления – ниже.

ПРИМЕРЫ КМИС СВЧ

Для эффективного применения КМИС-технологии на ОАО "Октава" разработан ряд интегральных транзисторов типа MESFET с различной шириной затвора ($W_T = 0,18\text{--}12,8 \text{ мм}$). Транзисторы имеют удельную выходную мощность 0,6–0,8 Вт/мм, коэффициент усиления (K_p) 8,5–9,0 дБ и КПД 45–50% на частоте 12 ГГц. Они изготавливаются на основе GaAs-структур, технология молекулярно-лучевой эпитаксии которых разработана в ИФП СО РАН. Этот ряд приборов полностью обеспечивает потребности в КМИС для разработки и производства

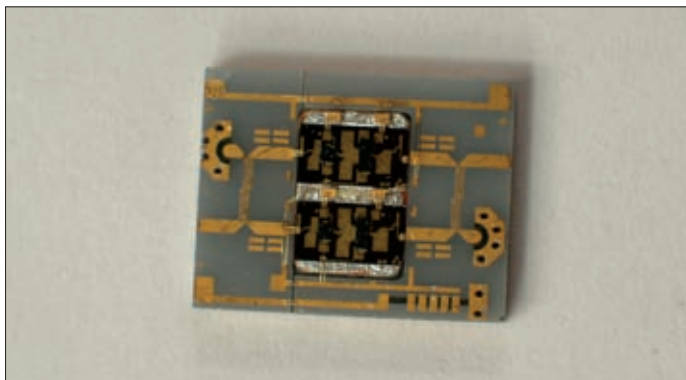


Рис.3. Широкополосный УМ на двухкаскадных КМИС
(рабочая полоса $\Delta f_p = 8-18$ ГГц, $P_{\text{вых}} \geq 1$ Вт, $K_p \geq 10$ дБ, КПД = 15%)

СВЧ-модулей в диапазоне частот до 18 ГГц с выходной мощностью до 10 Вт. Для каждой КМИС разрабатывается свой макрочип с использованием любого из разработанных интегральных транзисторов. Выбор типа транзистора зависит от технических требований, предъявляемых к разрабатываемой КМИС.

Используя технологию КМИС, в ОАО "Октава" на основе эпитаксиальных структур, поставляемых ИФП СО РАН, разработан ряд гибридных узкополосных и широкополосных СВЧ-устройств диапазона 2–18 ГГц для комплектации многофункциональных СВЧ-модулей, в том числе аппаратуры с АФАР. Среди них – малогабаритные широкополосные системы радиоэлектронного противодействия с АФАР (включая приемопередающие модули), комплект модулей для АФАР X-диапазона, а также гибридные широкополосные модули усилителей с выходной мощностью более 1 Вт в диапазоне 4–18 ГГц (рис. 2–4).

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КМИС

Дальнейшее развитие мощных КМИС связано прежде всего с улучшением характеристик транзисторов и теплоотвода от работающих приборов. Первым шагом в этом направлении является замена GaAs-транзисторов с затвором Шоттки (MESFET) транзисторами на псевдоморфных гетероструктурах (PHEMT). Разработанные в ОАО "Октава" PHEMT-транзисторы на гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/GaAs, выращиваемые

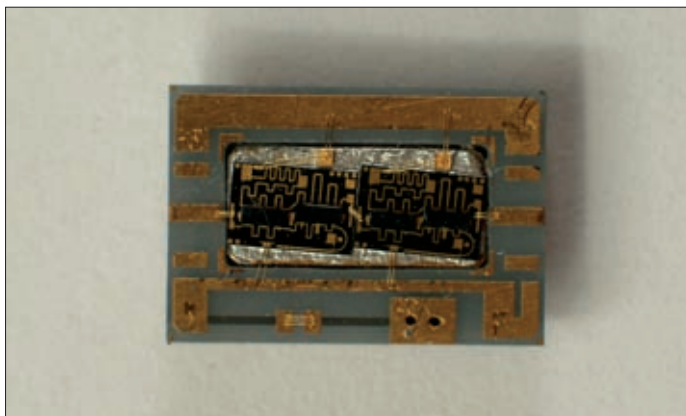


Рис.4. Сверхширокополосный УМ на КМИС неоднородного УРУ
(Рабочая полоса $\Delta f_p = 4-12$ ГГц, $P_{\text{вых}} \geq 0,4$ Вт, $K_p \geq 10$ дБ, КПД = 10%)

мых в ИФП СО РАН в лаборатории А.И.Торопова, имеют удельную насыщенную выходную мощность $P_{\text{уд}} = 1$ Вт/мм и малосигнальный коэффициент усиления $K_p = 7,2$ дБ на частоте 18 ГГц (при напряжениях на стоке 7,5 В и КПД 60%) [2]. Полученные результаты обеспечивают возможность увеличения выходной мощности КМИС узкополосных УМ в X-диапазоне (8–12,5 ГГц) до 10–15 Вт и до 3–4 – мощности широкополосного УМ в диапазоне 8–18 ГГц.

Дальнейшее кардинальное улучшение параметров КМИС связано с разработкой GaN/AlGaIn HEMT-транзисторов. Нитрид галлия – это уникальный широкозонный материал, позволяющий создавать высокоомощные и одновременно высокочастотные приборы благодаря высоким пробивным полям $33 \cdot 10^5$ В/см (в 8 раз выше, чем в GaAs), высокой плотности электронов в приборном канале $N_s > 10^{13}$ см⁻² (на порядок выше, чем в GaAs), большой скорости насыщения электронов в больших электрических полях $v_s = 2,7 \cdot 10^7$ см/с, которая остается высокой при повышенных температурах. Такое сочетание электронных свойств обеспечивает более чем 20-кратное увеличение выходной мощности транзисторов на AlGaIn/GaN-гетероструктурах по сравнению транзисторами на классических соединениях A_3B_5 (арсенид галлия, фосфид индия и др.) – порядка 30 Вт/мм на частоте 8 ГГц [3]. Для развития этого направления в ИФП СО РАН разрабатывается технология молекулярно-лучевой эпитаксии GaN/AlGaIn-гетероструктур. Уже получены гетероструктуры с электрическими параметрами, сравнимыми с зарубежными результатами [4], что дает основание для проведения работ по разработке технологии мощных СВЧ-транзисторов. КМИС-технология позволяет наиболее быстро использовать преимущества GaN-транзисторов и создать СВЧ-устройства нового поколения. Кроме того, свойство технологии КМИС снижать затраты на гетероструктуры в отношении GaN проявляется в еще большей степени, поскольку GaN-гетероструктуры в несколько раз дороже GaAs-структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мякишев Ю.Б., Барладян К.Л., Ожерельева Л.Ю. АС №1526521 (1987 год).
2. Бакаров А.К., Журавлев К.С., Торопов А.И. и др. Мощные полевые СВЧ-транзисторы на основе эпитаксиальных структур AlGaAs/GaAs. – Микроэлектроника, 2002, т.31, с.163–169.
3. Данилин В., Жукова Т., Кузнецов Ю. и др. Транзисторы на GaN. Пока самый "крепкий орешек". – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №4, с.20–29.
4. A.G. Pogosov, M.V. Budantsev, R.A. Lavrov, et al. Transport properties of the two-dimensional electron gas in GaN/AlGaIn heterostructures grown by ammonia molecular beam epitaxy. – Phys. Stat. Sol., 2006, v.203, p. 2186–2189.

и Резистивная память. Новый конкурент на рынке энергонезависимых ЗУ

Согласно отчету консультативной фирмы Web-Foot Research, процесс обратимого изменения сопротивления тонких окисных пленок позволит создать новый тип энергонезависимой памяти, образцы которой, возможно, поступят на рынок уже в этом году. Согласно оценкам производителя полупроводникового оборудования – компании Tegal, поставляющей технологические установки исследователям, резистивные ОЗУ (RRAM) обещают высокую плотность упаковки, низкую стоимость и малое энергопотребление микросхем памяти. Подобно многим другим технологиям до этого, RRAM обещают заменить флэш-память, если когда-нибудь у нее возникнут неразрешимые проблемы.

Хотя компании с неохотой берутся за изготовление изделий на основе незрелых или не полностью изученных материалов и процессов, размер рынка энергонезависимой памяти столь велик, что производители еще больше боятся потерять перспективный потенциальный сектор рынка, сулящий доход в много миллиардов долларов. Шумиха вокруг RRAM уже привела к тому, что только в США подано около дюжины патентных заявок эту технологию. Многие полупроводниковые компании ведут исследования в этой области и разрабатывают окисные пленки, процессы осаждения которых можно включить в стандартную технологию изготовления КМОП-микросхем.

Ячейки резистивного ОЗУ, как правило, представляют собой двухвыводные элементы, выполненные на основе окисных тонких пленок со структурой перовскита или пленок двойных окислов металлов. Предметом академических исследований такие пленки стали после открытия ориентировочно в 2000 году индуцированного электрическим импульсом эффекта изменения их сопротивления. Предполагается, что импульс создает в пленке множество проводящих нитей, которые и приводят к изменению сопротивления

пленки. Но при этом процесс образования таких проводящих дорожек является обратимым.

На основе анализа уже выданных или заявленных патентов США, можно сделать вывод, что в число компаний, разрабатывающих RRAM, входят Sharp, Sony, Samsung Electronics, LSI Logic, Matsushita Electric Industrial и Winbond Electronics. На сегодняшний день наиболее активные исследования в этой области ведет компания Samsung Electronics, разработавшая резистивное ОЗУ на базе многослойной пленки из проводящих и резистивных полимеров (полиимид и РСВМ производная фуллерена). Работы специалистов компании показали не только возможность создания резистивной памяти на базе полимерных материалов, но и возможность осаждения пленок таких материалов при низких температурах. А это позволит наносить матрицы памяти поверх обычных кремниевых микросхем. Несмотря на низкотемпературный процесс формирования пленок, разработчики утверждают, что они в течение часа смогут выдерживать температуру окружающей среды в 300°C без ухудшения характеристик. К тому же, показана возможность памяти выдерживать до 2000 циклов считывания/записи. Об итогах своих исследований разработчики компании Samsung доложат на ежегодной Международной конференции по электронным приборам IEDM, которая состоится 11–13 декабря этого года в Сан-Франциско.

Известно и о разработанном компанией Sharp совместно с Университетом Шизуока опытно образце RRAM, превосходящего по быстродействию флэш-память NAND-типа в 1000 раз. Правда, размер матрицы памяти и процесс ее изготовления не известны.

По материалам
www.eetimes.eu
www.eetimes.com