В.Н. Вьюгинов, В.А. Добров, А.В. Кириллов, С.Н. Морозов, Р.Г. Шифман

ЗАО «Светлана-Электронприбор»

Обзор новых разработок твердотельных ИЭТ ЗАО «Светлана-Электронприбор»

Представлены направления разработок твердотельных ИЭТ в ЗАО «Светлана-Электронприбор» и описаны результаты выполнения работ по ряду перспективных направлений: приборы СВЧ на широкозонных материалах GaN и SiC, ППМ АФАР см-диапазона длин волн, ЭКБ для сверхкороткоимпульсных сверхширокополосных приборов (СКИ СШП).

Ключевые слова: GaN, SiC, ППМ АФАР, pin-диод, модулятор SPST, переключатель SPDT, фазовращатель, ограничитель, СКИ СШП

В течение последних лет предприятие развивает несколько перспективных направлений разработок твердотельных ИЭТ, к числу которых относятся: приборы СВЧ на широкозонных материалах GaN и SiC; ППМ АФАР см-диапазона длин волн; ЭКБ для сверхкороткоимпульсных сверхширокополосных приборов.

GaN и SiC среди полупроводниковых материалов являются признанным лидером по своим электрофизическим и тепловым свойствам – ширине запрещенной зоны 3,1÷3,4 эВ и теплопроводности 1,7÷4,9 Вт/(см×К). Эти свойства позволяют обеспечить уникальные параметры приборов СВЧ для работы в широком температурном диапазоне и в жестких радиационных условиях. Именно поэтому созданию таких приборов в настоящее время уделяется столь пристальное внимание во всем мире. ЗАО «Светлана-Электронприбор» участвует в этих работах путем создания производства самих широкозонных материалов для СВЧ применений, разработки технологии обработки этих материалов и гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) из них, а также разработки и производства СВЧ приборов и устройств на их базе.

В 2013 году предприятие завершило разработку базовой технологии роста монокристаллов полуизолирующего карбида кремния путем сублимации. Она основана на испарении источника поликристаллического SiC и осаждения его компонент на монокристаллическую затравку SiC, находящуюся в более холодном месте реактора (метод «ЛЭТИ»). Рост происходит в атмосфере инертного газа. Техническая реализация двух ростовых установок с индукционным нагревом осуществлена в ЗАО «Светлана-Электронприбор» совместно с технологическим партнером – ООО «ГК «Нитридные кристаллы». В результате их освоения и проведения комплекса технологических работ, включающих разработку процесса синтеза чистого источника SiC из порошков Si и C, на предприятии начато производство карбида кремния политипа 6H диаметром три дюйма. Выращиваются монокристаллы полуизолирующего SiC двух типов: легированные ванадием и без дополнительного легирования.

Выращенные монокристаллы обрабатываются на технологической линейке,

состоящей самого современного импортного оборудования. Для резки монокристаллов на пластины используется станок многопроволочной резки японской фирмы Takatori модели MWS-45SN, который позволяет резать монокристаллы диаметром до 4 дюймов на пластины с разбросом толщины менее 20 мкм и величиной нарушенного слоя, не превышающей 15 мкм. Для шлифовки и полировки пластин после резки применяется оборудование немецкой фирмы Peter Wolters: станок AC470L для двусторонней шлифовки и станок AC470P для двусторонней полировки. Эти станки имеют одинаковую конструкцию. Шлифовка производится с помощью суспензии на основе смеси порошков карбида кремния и карбида бора с зерном 18÷20 мкм, а полировка – с помощью алмазной суспензии с зерном 3 мкм. Эта технология в отличие от технологии односторонней обработки, позволяет получить не только требуемые характеристики шероховатости – на обеих сторонах не более 2 нм после полировки, но и добиться величины прогиба и коробления подложек, не превышающих 5 мкм. Разброс толщины по ансамблю подложек не превышает 1 мкм, что полностью удовлетворяет требованиям к этому параметру для последующего химико-механического полирования (ХМП). Финишная подготовка поверхности подложек с качеством, пригодным для эпитаксии (epi-ready), производится на станке 32GPAW-TD японской фирмы SpeedFam. В результате ХМП поверхность подложки имеет шероховатость менее 2Å. Исследования качества подложек, выполненные в ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, показали, что по комплексу параметров подложки ЗАО «Светлана-Электронприбор» не уступают по качеству аналогичной продукции фирмы CREE (США):

Таблица 1

Параметр	Светлана-ЭП	CREE
Диаметр, мм	76,2±0,2	76,2±0,38
Толщина, мкм	370±50	350±25
Политип	6H	4H
Плотность микропор, $см^{-2}$	<30	<10
Плотность дислокаций, $см^{-2}$	$\leq 10^4$	$\leq 10^4$
Удельное сопротивление, Ом×см	$10^5 \div 10^{11}$	$\geq 10^5$
Качество обработки поверхности	epi-ready	epi-ready

В настоящее время предприятие в тесном взаимодействии с рядом профильных предприятий радиоэлектронной отрасли Российской Федерации и ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН участвует в разработке технологии ГЭС AlGaN/GaN на собственных подложках полуизолирующего карбида кремния диаметром 3 дюйма. Выполнение этой задачи позволит решить проблему импортозамещения не только по широкозонным материалам, но и по важнейшей номенклатуре ЭКБ СВЧ на их основе.

В ЗАО "Светлана-Электронприбор" проводится ряд работ по созданию ряда мощных GaN HEMT. При разработке таких транзисторов учтен мировой опыт, а также собственная многолетняя практика разработок СВЧ приборов на базе полупроводников группы A_3B_5. Базовая технология GaN HEMT (так называемый, построст) создается совместно со специалистами ООО «Научно-образовательный центр ФИАН и МИЭТ «Квантовые приборы и нанотехнологии». Перед специалистами, участвующими в работе, поставлена

задача конструирования и технологического воплощения кристаллов мощных GaN HEMT транзисторов на 5 Вт, 15 Вт, и 45 Вт для работы в S- и C-диапазонах длин волн. В настоящее время все технологические операции построста разработаны и апробированы с ГЭС на сапфировых подложках производства ОАО «Элма-Малахит». Достигнут устойчивый результат по величине удельной мощности порядка 2,5 Вт/мм в S-диапазоне, что типично для транзисторов с длиной затвора 0,5 мкм на сапфировых подложках. Эти работы продолжаются с импортными ГЭС на подложках полуизолирующего карбида кремния. Уже достигнуты стабильные ВАХ транзисторов с шириной затвора 3,5мм, 7мм и 14мм. Коллапса тока не наблюдается. В ближайшее время будет создана метрика для импульсных измерений СВЧ параметров этих транзисторов. По окончании упомянутой выше разработки технологии ГЭС AlGaN/GaN на собственных подложках полуизолирующего карбида кремния постростовая технология, созданная в ЗАО «Светлана-Электронприбор», даст предприятию возможность изготавливать транзисторы GaN HEMT полностью на отечественных материалах.

Наряду с разработкой транзисторов GaN HEMT предприятие начало в 2013 году работы по созданию pin-диодов на основе SiC эпитаксиальных p+-n_i-n+структур с проводящими подложками 4H-SiC. Известно, что СВЧ устройства на pin-диодах Si обеспечивают время переключения от миллисекунд до единиц наносекунд и переключение СВЧ мощности в импульсном режиме от нескольких милливатт до единиц киловатт. Однако рабочая температура этих диодов не может превышать 125°С, что исключает их использование в жестких условиях эксплуатации. Широкозонный материал типа SiC по своим электрофизическим параметрам позволяет решить эту проблему. Однако, литературные данные о pin-диодах на основе SiC практически отсутствуют. За рубежом публикуются работы в основном по направлению SiC диодов Шоттки для силовой электроники. Возможно, это связано с применением pin-диодов на основе SiC в СВЧ электронике экстремального назначения. Таким образом, работы предприятия по этому направлению являются чрезвычайно актуальными.

Для разработки pin-диодов на основе SiC использовались SiC эпитаксиальные p+-n_i-n+структуры фирмы ASCATRON с параметрами эпитаксиальных слоев: p+ слой 1 мкм, 2×10^{19}см$^{-3}$; n_i слой 10 мкм, 1×10^{14} см$^{-3}$; n+-подложка 4H-SiC 0,02 Ом×см. В ЗАО «Светлана-Электронприбор» разработана оригинальная конструкция pin-диодов и создана базовая технология их изготовления, позволяющая получать контакты с хорошей адгезией к SiC и с удельным сопротивлением $(6\div7)\times10^{-6}$ Ом×см^2 к p^+- типу и 1×10^{-4} Ом×см^2 к n^+-типу. Изготовленные по этой технологии диоды имеют для разных типов приборов пробивное напряжение около 900 В при обратном токе 1 мкА, сопротивление 1÷5 Ом при 100 мА, ёмкость от 0,35 до 0,03 пФ при обратном напряжении 40В. Время обратного восстановления в режимах $I_{пр}/I_{обр}$ 10мА/10мА зависит от типа прибора и лежит в диапазоне (25÷190) нс.

На основе SiC pin-диодов на предприятии ведутся разработки радиационно-стойких управляющих устройств СВЧ в диапазонах длин волн от дециметров до миллиметров. В ноябре 2014 года завершаются две опытно-конструкторские работы, в которых создаются

четыре типа СВЧ приборов трех частотных литер в диапазонах S, X, Ka. В настоящее время все они проходят предварительные испытания.

Разрабатываемые устройства построены на основе модулятора SPST, выполненного на SiC pin-диоде. Модулятор обеспечивает в S-диапазоне полосу 120% и переключает импульсную мощность 1000 Вт с потерями менее 1,5 дБ и быстродействием 50 нс. В X-диапазоне он имеет параметры 40%, 800 Вт, 2,5 дБ, 20 нс, в Ka-диапазоне – 10%, 500 Вт, 3 дБ, 10 нс, соответственно. Модулятор выполнен в виде ГИС в S- и X-диапазонах длин волн и в волноводном исполнении на щелевой линии в Ka-диапазоне. Такие же параметры по мощности и быстродействию имеют разработанные в ЗАО «Светлана-Электронприбор» переключатель, защитное устройство и фазовращатель, построенные на основе модулятора соответствующего диапазона длин волн и описанные ниже.

Переключатель 1×2 SPDT в S-диапазоне обеспечивает полосу 55%, прямые потери менее 1,5 дБ, потери запирания и развязку между каналами более 20 дБ. В X-диапазоне – 10,5%, 2,5 дБ, 20 дБ, в Ka-диапазоне – 10%, 3,5 дБ, 20 дБ соответственно.

Защитное устройство представляет собой самоуправляемый модулятор SPST и во всех частотных литерах обеспечивает просачивающуюся мощность не более 1 Вт в полосе частот, равной полосе работы соответствующего модулятора.

Фазовращатель S-диапазона имеет дискрет фазы 22,5° и работает в полосе частот 7%. Частотная литера X-диапазона представляет собой двух битный фазовращатель, а Ka-диапазона – фазовый модулятор 0°/180°, оба с полосой 6%.

Второе важное направление работ предприятия – разработка и производство ППМ АФАР см-диапазона длин волн. Это направление уже шесть лет является одним из основных. При создании ППМ АФАР используется существующие научно-технические и производственные заделы по дискретным и монолитным элементам (pin-диоды Si, GaAs, транзисторы GaAs и МИС на их основе), а также опыт разработок и производства приемно-усилительных и передающих модулей.

В 2013 году успешно завершена разработка передающего модуля C-диапазона длин волн M45230 (АПНТ.434850.061ТУ). Модуль предназначен для усиления и окончательной обработки СВЧ сигналов по фазе в передающем тракте РЛС с АФАР. Выходной каскад модуля выполнен на транзисторе GaN. В настоящее время осуществляются поставки потребителям. Основные технические характеристики модуля приведены в таблице 2.

В 2014 году завершается разработка 4-канального ППМ АФАР S-диапазона длин волн M45330 (АПНТ.434850.074 ТУ). В настоящее время он проходит предварительные испытания. Модуль содержит передающие каналы, построенные на МИС GaAs и транзисторах GaN HEMT, а также приемные каналы на МИС GaAs. Конструкция модуля – герметичный корпус, в котором кроме СВЧ каналов встроены вторичные источники питания, РС контроллеры управления амплитудой и фазой, а также модуляторы передающих каналов. Отвод тепла от корпуса осуществляется контактным образом. Основные параметры и технические характеристики модуля приведены в таблице 3.

Таблица 2

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Норма		
		не менее	номинал	не более
Выходная непрерывная мощность, Вт	$P_{вых}$	5		
Коэффициент усиления, дБ	$K_у$	30		
Минимальный дискрет фазы, градус	$\varphi_{мин}$		22,5	
Погрешность установки фазы в диапазоне рабочих частот в основных фазовых состояниях (максимальная), градус	$\delta\varphi$			±12
Время переключения состояний фазы, мкс				2
Амплитуда сигналов управления, В -уровень логического «0», В -уровень логической «1», В	 $U_{су0}$ $U_{су1}$	 0 4,8		 0,5 5,2

Таблица 3

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Норма		
		не менее	номинал	не более
Полоса рабочих частот, МГц	$\Delta f_р$		400	
Выходная импульсная мощность передающих трактов, Вт	$P_{вых}$	45		57
Коэффициент усиления приемных трактов, дБ	$K_у$	20		24
Коэффициент шума приемных трактов, дБ	$K_ш$			3
Минимальный дискрет фазы, градус	$\varphi_{мин}$		5,625	
Погрешность установки фазы в диапазоне рабочих частот в основных фазовых состояниях, градус	$\delta\varphi$			±12
Минимальный дискрет регулировки коэффициента усиления приемных трактов, дБ	$\delta K_у$		0,5	
Глубина регулировки коэффициента усиления приемных трактов, дБ	$\Delta K_у$		31,5	
Максимальная допустимая импульсная входная мощность приемников, Вт	$P_{вх\ макс.}$			50
Диапазон рабочих температур, ºС		–60		+85
Гамма-процентная наработка, час		10000		
Гамма-процентный срок сохраняемости, лет		20		

Третье новое направление работ предприятия – разработка и производство ЭКБ для сверхкороткоимпульсных сверхширокополосных приборов (СКИ СШП). Это направление получило свое развитие благодаря тому, что предприятию в 2013 году удалось выполнить пионерскую разработку антенного переключателя (АП) для радиолокаторов, работающих на новых физических принципах. Для реализации сверхширокой полосы была предложена схема полупроводникового АП на основе элементов с сосредоточенными параметрами как в МИС СВЧ, сочетающая в себе свойства прямой и инверсной схем диодных переключателей. В качестве управляющих элементов использованы быстродействующие бескорпусные кремниевые балочные pin диоды и мощные арсенид-галлиевые pin диоды собственного производства. АП имеет потери в режиме передачи не более 1,0 дБ при амплитуде импульса передатчика 1 кВ и длительности импульса 1 нс. При этом потери сигнала в режиме приёма составляют не более 1,5 дБ, а величина «развязки» каналов передачи и приёма – не менее 55 дБ.

В текущем году начинается разработка нового типа ППМ для радиолокаторов, работающих на основе СКИ СШП. Кроме АП он содержит также модулятор и генератор импульсов с амплитудой 20 В и длительностью 0,1 нс. Такой ППМ будет использоваться для решения радиолокационных задач в зоне дальностей 5÷10 м, но может стать основой для целого ряда применений.

В настоящее время ЗАО «Светлана-Электронприбор» продолжает разработки твердотельных ИЭТ в актуальных направлениях, создает новые научно-технические заделы и организует производство ИЭТ для обеспечения потребности предприятий РФ.