

ЮРИЙ СОЛОВЬЕВ, к. т. н., заместитель директора по науке, АО «Светлана-Электронприбор»

АНДРЕЙ РЕБРОВ, главный метролог, АО «Светлана-Электронприбор»

НИКОЛАЙ ТРАВИН, начальник отдела производства монокристаллов и подложек на основе карбида кремния, АО «Светлана-Электронприбор»

АНДРЕЙ ЛУБЯНОЙ, заместитель начальника отдела разработки и производства полупроводниковых приборов на основе АЗВ5 и А4В4

ОЛЕГ ВЕНЕДИКТОВ, начальник лаборатории роста монокристаллов карбида кремния

ОБЗОР НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СВЧ ЭКБ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ И НИТРИДА ГАЛЛИЯ В АО «СВЕТЛАНА-ЭЛЕКТРОНПРИБОР»

Начиная с 2013 года в АО «Светлана-Электронприбор» активно проводятся работы в области инновационных технологий производства широкозонных материалов и элементной компонентной базы (ЭКБ) на основе карбида кремния и нитрида галлия.

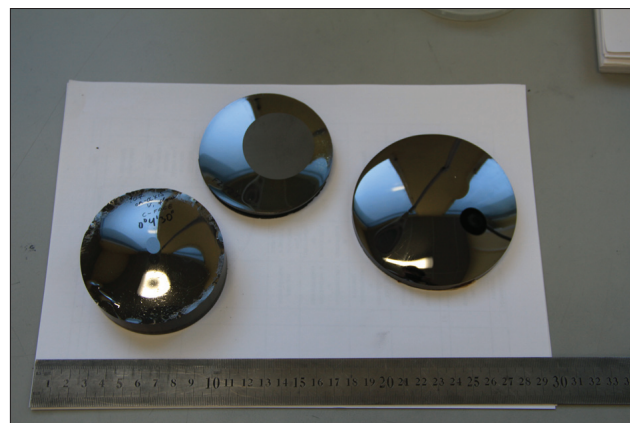
Развитие инновационных технологий проходило по трем основным направлениям:

- создание промышленной технологии полуизолирующих подложек карбида кремния;
- разработка дизайна и технологии эпитаксиального роста транзисторных эпитаксиальных структур на разработанных подложках карбида кремния для создания кристаллов СВЧ рНЕМТ-транзисторов и монокристаллов интегральных схем (МИС) на их основе;
- разработка технологии изготовления ЭКБ (транзисторов, МИС и аттенуаторов) на основе карбида кремния и нитрида галлия.

СОЗДАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУИЗОЛИРУЮЩИХ ПОДЛОЖЕК КАРБИДА КРЕМНИЯ

Благодаря своим уникальным характеристикам полуизолирующие подложки карбида кремния находят широкое применение в области создания и производства СВЧ ЭКБ на основе нитрида галлия. Использование полуизолирующих подложек карбида кремния позволяет создавать СВЧ-приборы для жестких условий эксплуатации с высокой удельной мощностью и напряжением. Отсутствие отечественных полуизолирующих подложек карбида кремния в условиях импортозамещения показало актуальность развития данного направления.

В период с 2015 по 2019 год специалистами АО «Светлана-Электронприбор» были проведены опытно-конструкторские

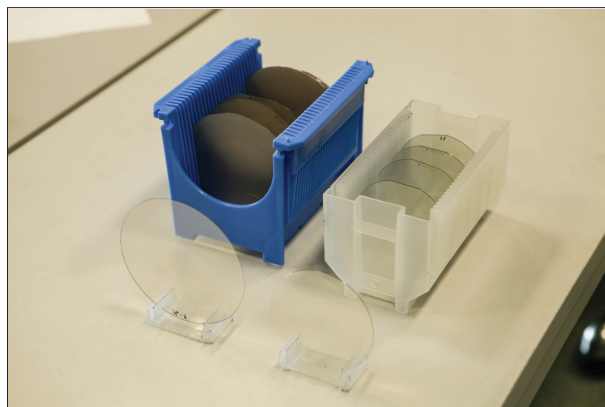


▲ Рис. 1. Монокристаллы полуизолирующего карбида кремния

работы (ОКР) в области объемного роста монокристаллов полуизолирующего карбида кремния методом сублимации и изготовления подложек качества epi-ready.

В результате выполнения ряда ОКР были разработаны и внедрены в производство:

- технологии промышленного роста объемных полуизолирующих кристаллов карбида кремния, политипов 6H и 4H диаметром 76,2 и 100 мм (рис. 1);
- технологии резки, шлифовки и полировки полуизолирующих подложек карбида кремния качества epi-ready (рис. 2);



▲ Рис. 2. Подложки полуизолирующего карбида кремния диаметром 76,2 и 100 мм

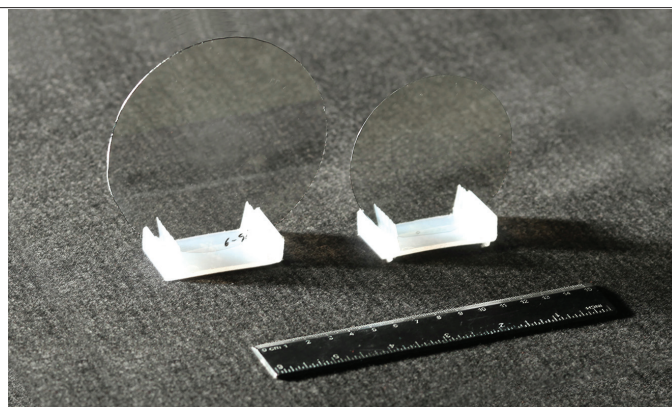


Таблица 1. Сравнение электрофизических и морфологических характеристик, разработанных в АО «Светлана-Электронприбор» и импортных полуизолирующих подложек

№	Параметр	АО «Светлана-Электронприбор»	SICC, Китай	WolfSpeed (CREE), США
1.1	Диаметр, мм	100,0 _{-0,5}	100,0 _{-0,5}	100,0 _{-0,5}
1.2	Толщина, мкм	370±50	350 ±25 или 500 ±25	500 ±25
1.3	Разброс по толщине, мкм	≤ 5	≤ 10	≤ 5
1.4	Коробление, мкм	≤ 25	≤ 30	≤ 45
1.5	Прогиб, мкм	≤ 25	≤ 25	–
1.6	Политип	4Н	4Н	4Н
1.7	Ориентация	on-axis {0001} ±0,25°	on-axis {0001} ±0,20°	on-axis {0001} ±0,25°
1.8	Удельное сопротивление, Ом·см	≥ 10 ⁶	≥ 10 ⁵	≥ 10 ⁶
1.9	Плотность микропор, см-2	≤ 1	≤ 5	≤ 1
2.0	Обработка поверхности	Двусторонняя полировка, Si-сторона ХМП	Двусторонняя полировка, Si-сторона ХМП	Двусторонняя полировка, Si-сторона ХМП



▲ Рис. 3. Установки объемного роста монокристаллов карбида кремния

- разработаны методики контроля морфологических и электрофизических характеристик полуизолирующих подложек карбида кремния;
- в ходе выполнения комплексного проекта по заказу Минпромторга РФ была разработана промышленная установка ВЧ индукционного нагрева реактора для объемного роста монокристаллов карбида кремния диаметром до 100 мм включительно (рис. 3).

Анализ электрофизических и морфологических характеристик созданных полуизолирующих подложек карбида кремния показал, что полученные параметры не уступают характеристикам импортных аналогов (табл. 1).

Успешное развитие промышленной технологии полуизолирующих подложек карбида кремния от разработки установок объемного роста монокристаллов до изготовления и контроля качества конечного продукта — подложки, позволило спроецировать полученные наработки в области СВЧ-материаловедения на направление силовой микроэлектроники.

Сегодня АО «Светлана-Электронприбор» совместно с рядом зарубежных

компаний принимает активное участие в разработке технологии производства подложек, которые применяются в качестве теплоотводов мощных микросхем на основе кремния. Полученные опытные образцы проводящих монокристаллических и поликристаллических подложек карбида кремния обладают высокими значениями теплопроводности (> 3,6 Вт/см при T = +22 °C) и низкими значениями удельной проводимости (менее 0,03 Ом·см), что обеспечивает выполнение требований, предъявляемых к теплоотводам для мощных микросхем.

РАЗРАБОТКА ДИЗАЙНА И ТЕХНОЛОГИИ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА НИТРИДГАЛЛИЕВЫХ рНЕМТ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ПОДЛОЖКАХ КАРБИДА КРЕМНИЯ

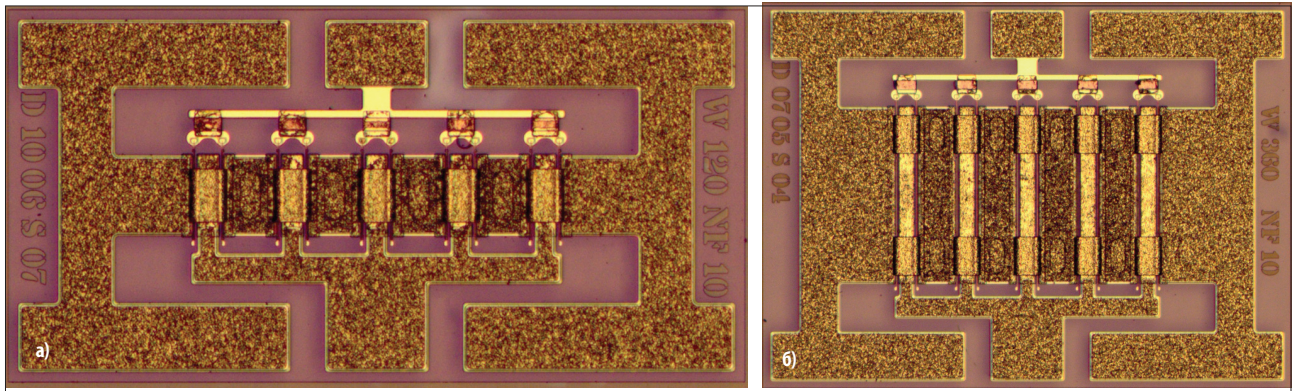
Начиная с 2015 года АО «Светлана-Электронприбор» совместно с НТИЦ микроэлектроники РАН проводили работы по созданию дизайна и технологии роста эпитаксиальных структур на основе нитрида галлия на подложках карбида кремния методом газофазной эпитаксии. Для определения дизайна эпитаксиальных рНЕМТ-гетероструктур выполнены

работы по численному моделированию в области состава эпитаксиальных слоев, концентрации основных носителей заряда в эпитаксиальных слоях, определены оптимальные характеристик буферного слоя транзисторной гетероструктуры. Применение методов численного моделирования с последующей экспериментальной проверкой результатов моделирования эпитаксиальным ростом транзисторных гетероструктур позволило разработать дизайн и технологию роста эпитаксиальных слоев нитрида галлия и тройных твердых растворов замещения «алюминий-галлий-азот» методом газофазной эпитаксии, обеспечивающих концентрацию двумерного электронного газа в канале 9×10^{12} – $1,15 \times 10^{13}$ см⁻² и подвижностью основных носителей заряда 1750–2100 см²/В·с.

Достигнутые положительные результаты в области разработки дизайна и технологии газофазного эпитаксиального роста рНЕМТ-гетероструктур на основе нитрида галлия, высокая воспроизводимость по морфологическим и электрофизическим характеристикам эпитаксиальных гетероструктур, позволила в 2017 году перейти к созданию технологии изготовления СВЧ-транзисторов для работы в диапазоне частот 1–12 ГГц.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭКБ (ТРАНЗИСТОРОВ, МИС И АТТЕНУАТОРОВ) НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ И НИТРИДА ГАЛЛИЯ

За последние три года АО «Светлана-Электронприбор» удалось реализовать вертикально-интегрированную структуру производства ЭКБ на основе нитрида галлия, включая изготовление полуизолирующих подложек карбида кремния политипов 4 Н и 6 Н, применить сквозное моделирование «эпитаксиальная гетероструктура — топология — электрофизические характеристики транзисторов», освоить процессы газофазной эпитаксии транзисторных рНЕМТ-гетероструктур, разработать



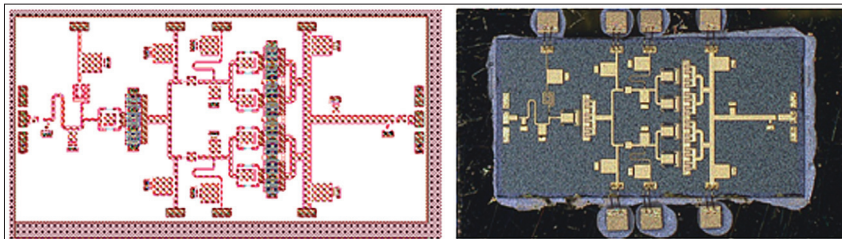
▲ Рис. 4. Кристаллы рHEMT-транзисторов с затворной периферией: а) 10×120 мкм, б) 10×360 мкм

Таблица 2. Импульсные характеристики транзисторов S-диапазона (1–3 ГГц) частот с периферией затворной металлизации 10×360 мм, 28 В ($\tau = 5$ нс, $Q = 50$), $f = 3$ ГГц

Параметр	Значение	Режим измерения
Выходная мощность	28 Вт	$U_c = 28$ В, $I_c = 500$ мА; CW
Коэффициент усиления	17 дБ	
КПД (РАЕ)	65%	
Удельная мощность	5,1–5,2 Вт/мм	

Таблица 3. характеристики транзисторов X-диапазона (8–12 ГГц) частот с периферией затворной металлизации 10×120 мм

Параметр	Значение	Режим измерения
Выходная мощность	5 Вт	$U_c = 31,5$ В, $I_c = 500$ мА, CW
Коэффициент усиления	8 дБ	
КПД (РАЕ)	36%	
Удельная мощность	> 4,3 Вт/мм	



▲ Рис. 5. Топология и опытный образец МИС на основе рHEMT нитрид-галлиевой гетероструктуры для работы в частотном диапазоне $f = 10$ –12 ГГц с выходной мощностью 12 Вт

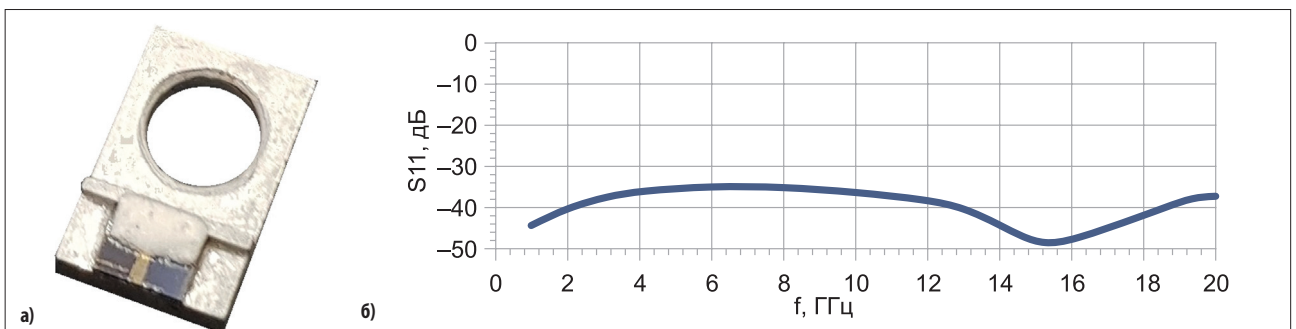
и внедрить технологические процессы изготовления усилительных и переключательных транзисторов с топологическими нормами 0,5 и 0,25 мкм. На основании полученных результатов измерений электрофизических характеристик опытных образцов кристаллов рHEMT-транзисторов были созданы библиотеки активных элементов.

На сегодня в АО «Светлана-Электронприбор» разработаны и нашли применение в СВЧ-модулях собственного производства нитрид-галлиевые усилительные транзисторы с периферией 10×120 мм и 10×360 мм (рис. 4), которые обеспечивают работоспособность выходных каскадов устройств в частотных диапазонах 3–12 ГГц.

В таблицах 2, 3 представлены электрофизические характеристики этих нитрид-галлиевых кристаллов транзисторов.

Разработанный и внедренный в АО «Светлана-Электронприбор» комплексный подход к реализации производства СВЧ ЭКБ на основе карбида кремния и нитрида галлия позволил в конце 2019 года приступить к созданию монолитных интегральных схем С- и X- (4–12 ГГц) диапазонов частот. На сегодня выполнена верификация технологических процессов изготовления МИС, проведены измерения S-параметров активных (каскады кристаллов транзисторов) и пассивных (индуктивности, емкости, сопротивления) элементов конструкции схем, разработаны библиотеки пассивных элементов для проектирования МИС на основе нитрида галлия. Изготовлены опытные образцы МИС для X-диапазона частот (рис. 5). В текущем году планируется комплекс работ, направленных на проведение измерений параметров разработанных кристаллов и проведение испытаний в составе приемно-передающих модулей.

Одним из перспективных направлений развития ЭКБ на основе широкозонных материалов является создание СВЧ высокоомных нагрузок. Внедрение промышленной технологии полужолирующих подложек карбида кремния в АО «Светлана-Электронприбор» позволило не только обеспечить качественный по своим характеристикам эпитаксиальный рост транзисторных структур



▲ Рис. 6. а) Образец микрополосковой СВЧ-нагрузки с рабочей частотой до 18 ГГц; б) результаты измерения микрополосковой СВЧ-нагрузки 50 Ом в измерительной оснастке

Таблица 4. Основные электрические параметры

Обозначение типа модуля	Основные (квалификационные) параметры при температуре окружающей среды $T_{окр} = (25 \pm 10) ^\circ\text{C}$ (наименование, буквенное обозначение, единица измерения)			
	Рабочий диапазон частот Δf_r , ГГц		Номинальное ослабление A , дБ	Отклонение ослабления от номинального значения δA , дБ
	нижняя граница	верхняя граница		
	не более	не менее	номинал	не более
M34736-1	0,01	12,4	5,0	1,0
M34736-6	0,01	12,4	60,0	2,0
M34737-4	0,01	18,0	20,0	2,0
M34737-6	0,01	18,0	40,0	2,0



▲ Рис. 7. Внешний вид согласованных нагрузок до 40 ГГц

на основе нитрида галлия, но и разработать на основе полупроводящих подложек отечественных аналогов СВЧ-нагрузок (рис. 6), поддерживающих работоспособность до 18 ГГц.

Благодаря высоким значениям теплопроводности ($> 3,6 \text{ Вт/см}^2$ $T = +22 ^\circ\text{C}$) полупроводящих подложек карбида кремния стало возможным обеспечить рассеиваемую мощность до 20 Вт и улучшить частотно-мощностные характеристики резистора в 2,5 раза по сравнению с СВЧ-резистором на подложке AlN.

На базе разработанной топологии микрополосковой линии согласованной нагрузки была выпущена линейка коаксиальных согласованных нагрузок до 40 ГГц с разъемом типа 2,92 мм с КСВН не более 1,3 на входную непрерывную мощность 5, 10, 20 и 30 Вт (рис. 7).

В 2020 году АО «Светлана-Электронприбор» завершила выполнение комплекса работ, целью которых было проектирование и освоение серийного производства двух типов коаксиальных аттенюаторов фиксированных с уровнем входной мощности до 25 Вт.

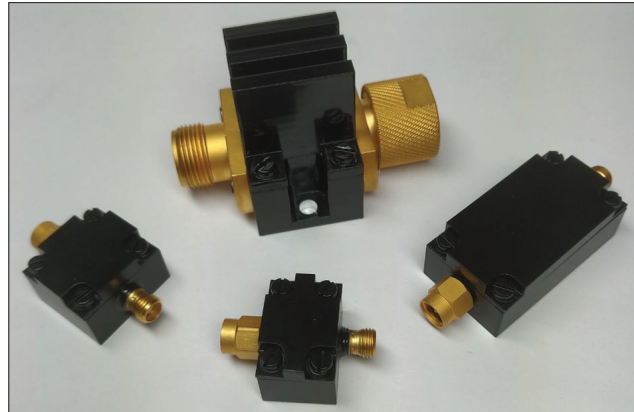
Данные аттенюаторы конструктивно выполнены на основе полупроводящих подложек карбида кремния толщиной 0,5 мм в металлическом корпусе с коаксиальными разъемами типа SMA (M34736) и в металлическом корпусе с радиатором с коаксиальными разъемами типа N (M34737) (рис. 8).

Ослабление в аттенюаторах осуществляется за счет рассеивания части входной мощности в тепло в резистивном слое (активная зона) микрополосковой платы, с дальнейшим отведением тепла на корпус аппаратуры. Охлаждение изделий — контактное за счет теплопередачи на элементы конструкции аппаратуры, обеспечивающее температуру в месте крепления изделия не более $+ 85 ^\circ\text{C}$.

Максимальная входная непрерывная мощность для M34736—2 Вт, для M34737—25 Вт. Максимальная входная импульсная мощность для M34737—1 кВт с длительностью импульса не более 5 мкс, скважность не менее 50. Основные электрические параметры представлены в таблице 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние пять лет АО «Светлана-Электронприбор» разработало и внедрило в производство ряд инновационных



▲ Рис. 8. Внешний вид коаксиальных фиксированных аттенюаторов

технологий в области широкозонных материалов для СВЧ-применений, разработало вертикально-интегрированную структуру производства ЭКБ на основе широкозонных материалов.

На сегодня АО «Светлана-Электронприбор» является единственным предприятием в Российской Федерации, которое реализовало полное импортозамещение в области создания ЭКБ на основе карбида кремния и нитрида галлия. ●