

Обзор направления развития СВЧ ЭКБ на основе карбида кремния в АО «Светлана-Электронприбор»

Н.Ю. Гладков, Ю.В. Соловьев, А.Н. Ребров, Н.К. Травин, О.В. Венедиктов

АО «Светлана-Электронприбор»

Аннотация: в данной работе описано развитие направления разработки и производства изделий карбид кремниевой и нитрид галлиевой электронной компонентной базы в АО «Светлана-Электронприбор»

Ключевые слова: карбид кремния, теплоотвод, нитрида галлия, СВЧ-нагрузка, аттенуатор

1. Введение

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 [1–2].

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 монолитных интегральных схем (МИС) на их основе [3–4];
- разработка технологии изготовления ЭКБ (транзисторов, МИС и аттенуаторов) на основе карбида кремния и нитрида галлия.

2. Создание промышленной технологии полуизолирующих подложек карбида кремния

Благодаря своим уникальным характеристикам полуизолирующие подложки карбида кремния (SiC) 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 годы специалистами АО «Светлана-Электронприбор» были проведены опытно-конструкторские 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 6Н и 4Н диаметром 76,2 и 100 мм;
 - технологии резки, шлифовки и полировки полуизолирующих подложек карбида кремния качества «epi-ready» (рисунок 1);
 - 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 (рисунок 2) [5].



Рисунок 1. Монокристаллы и подложки полуизолирующего карбида кремния диаметром 76,2 и 100 мм



Рисунок 2. Установки объемного роста монокристаллов карбида кремния

Анализ электрофизических и морфологических характеристик, разработанных полуизолирующих подложек карбида кремния, показал, что полученные параметры не уступают параметрам импортных аналогов (таблица 1).

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

№	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} $\pm 0,25^0$	on-axis {0001} $\pm 0,20^0$	on-axis {0001} $\pm 0,25^0$
1.8	Удельное сопротивление, Ом·см	$\geq 10^8$	$\geq 10^5$	$\geq 10^6$
1.9	Плотность микропор, см ⁻²	≤ 1	≤ 5	≤ 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 разработки окон вывода энергии диапазона 100÷600 кВт [6–7] и для развития силовой микроэлектроники.

Сегодня АО «Светлана-Электронприбор» совместно с рядом зарубежных компаний принимает активное участие в области создания 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 $T=22^0\text{C}$) и низкими значениями удельной проводимости (менее $0,03$ Ом·см), что обеспечивает выполнение требований, предъявляемых к теплоотводам для мощных микросхем.

3. Разработка технологии изготовления пассивных СВЧ элементов на основе карбида кремния

Одним из перспективных направлений развития ЭКБ на основе широкозонных материалов является создание мощных элементов СВЧ тракта. Внедрение промышленной технологии полуизолирующих подложек карбида кремния в АО «Светлана-Электронприбор» позволило не только обеспечить качественный по своим характеристикам эпитаксиальный рост транзисторных структур на основе нитрида галлия, но и разработать на основе полуизолирующих подложек отечественных аналогов СВЧ-нагрузок, обеспечивающих работоспособность до 18 ГГц [8].

Благодаря высоким значениям теплопроводности ($> 3,6$ Вт/см $T= 22^0\text{C}$) полуизолирующих 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 нитрида галлия (AlN).

На базе разработанных топологий 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 Вт, 10 Вт, 20 Вт и 30 Вт и был завершён комплекс работ по проектированию и освоению серийного производства двух типов коаксиальных аттенуаторов, фиксированных с уровнем входной мощности до 25 Вт (рисунок 3 а, б).



а)



б)

Рисунок 3. а) Внешний вид согласованных нагрузок до 40 ГГц; б) Внешний вид коаксиальных фиксированных аттенуаторов

Данные аттенуаторы конструктивно выполнены на основе полуизолирующих подложек карбида кремния толщиной 0,5 мм в металлическом корпусе с коаксиальными разъемами типа SMA (М34736) и в металлическом корпусе с радиатором с коаксиальными разъемами типа N (М34737). Ослабление в аттенуаторах 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°C [9].

Максимальная входная непрерывная мощность для М34736 – 2 Вт, для М34737 – 25 Вт. Максимальная входная импульсная мощность для М34737 – 1 кВт с длительностью импульса не более 5 мкс, скважность не менее 50. Основные электрические параметры представлены в таблице 2.

Таблица 2. Основные электрические параметры аттенуаторов на основе полуизолирующих подложек карбида кремния

Обозначение типа модуля	Рабочий диапазон частот Δfr, ГГц	Номинальное ослабление А, дБ	Отклонение ослабления от номинального значения δА, дБ
М34736-1	0,01÷12,4	5,0	< 1,0
М34736-6	0,01÷12,4	60,0	< 2,0
М34737-4	0,01÷18,0	20,0	< 2,0
М34737-6	0,01÷18,0	40,0	< 2,0

4. Заключение

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

Список литературы

1. Лебедев А.А., Белов С.В., Лебедев С.П., Литвин Д.П., Никитина И.П., Васильев А.В., Макаров Ю.Н., Нагалюк С.С., Стрельчук А.М., Попов В.В., Вьюгинов В.Н., Шифман Р.Г., Кузмичёв Ю.С., Травин Н.К., Венедиктов О.В. Начало промышленного выпуска SiC подложек и приборов на их основе // Труды 1-й российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники», посвящённой 110-ю со дня рождения О. В. Лосева / Под ред. А. Э. Рассадина. --- Н. Новгород: НИЖЕГОРОДСКАЯ РАДИОЛАБОРАТОРИЯ. 2013. В 2-х т. Т. 1. С. 23-24
2. В.Н. Вьюгинов, Н.К. Травин, О.В. Венедиктов, М.М. Коровкина, А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин. Развитие базовой технологии производства подложек полужолирующего карбида кремния. /Сборник статей Четвертой всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», с. 79-81, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015, ISBN 978-5-7629-1634-9
3. А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, А.В. Сахаров, Н.К. Травин, О.В. Венедиктов, В.П. Иванова, Я.М. Парнес, В.Е. Земляков, В.В. Волков, В.Н. Вьюгинов, М.А. Яговкина, В.Р. Тихомиров, М.Н. Мизеров. Рост НЕМТ гетероструктур AlGaIn/GaN на подложках SiC отечественного производства. /Тезисы докладов 10-й Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы", с. 129-130, СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2015, ОК 005-93, т.2; 953004
4. Парнес Я.М., Тихомиров В.Г., Зыбин А.А., Куртеев Е.Е., Баловнев Н.К., Лубяной А.Н., Земляков В.Е., Кочанова Е.В., Альмухаметова А., Петров В.А. Методика построения нелинейной модели мощных GaN транзисторов. /Международный форум «Микроэлектроника-2017» 3-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и электронные модули», с. 379-380, г. Алушта.: Изд-во Техносфера, 02-07 октября 2017 г.
5. Н.Ю. Гладков, В.В. Лучинин, В.Н. Вьюгинов, В.А. Клевцов, Н.К. Травин. Развитие производства карбида кремния в ПАО «Светлана» от базовой технологии к вертикальной интеграции. /Сборник статей VII всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», с. 14-16, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018, ISBN 978-5-7629-1634-9
6. В.В. Паршин, Е.А. Серов, Г.Г. Денисов, Б.М. Гарин, В.Н. Вьюгинов, В.А. Клевцов, Н.К. Травин. Карбид кремния для окон вывода энергии средней мощности ММ диапазона. /Международная конференция CriMiCo'2017, г. Севастополь, 10-16 сентября 2017 г.
7. Vladimir Parshin, Evgeny Serov, Grigoriy Denisov, Boris Garin, Roman Denisyuk, Vladimir V'yuginov, Valeriy Klevtsov, Nikolai Travin: Silicon carbide for high-power applications at MM and THz ranges // Diamond & Related Materials. – 80 (2017) 1–4
8. В.Н.Вьюгинов, А.Н.Ребров, А.А. Зыбин. О результатах исследования мощных микрополосковых СВЧ-нагрузок на подложке полужолирующего карбида кремния./ Индустрия №4/2017.
9. А.Н. Ребров, А.Д. Григорьев. Мощная СВЧ нагрузка с рабочим диапазоном частот до 40 ГГц./ Тезисы докладов 15й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», г. Новосибирск, 2020 г.