

*Афанасьев А.В., Голубков В.А., Иванов А.С.,  
Иванов Б.В., Ильин В.А., Коряков А.В.,  
Лагош А.В., Лучинин В.В., Сергушичев К.А.  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»*

## **Семейство карбидокремниевых твердотельных, вакуумных и микромеханических ключей для экстремальных условий эксплуатации**

*Представлены результаты выполненных в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете конкурентоспособных разработок электронной компонентной базы на карбиде кремния для силовой импульсной широкополосной и сверхвысокочастотной электроники.*

**Ключевые слова:** Карбид кремния, электронная компонентная база, сверхвысокочастотная электроника.

### **Введение**

В современной международной конкурентной среде, ориентированной на решение задач в области создания электронной компонентной базы (ЭКБ), достаточно редко можно встретить ссылки на отечественные разработки, коренным образом изменившие рынок инновационной продукции по критическим направлениям, определяющим технологическую независимость и безопасность государства.

Следует отметить, что разработка в Ленинградском электротехническом институте в 1976 – 1980 г.г. метода выращивания объемных монокристаллов карбида кремния (метод ЛЭТИ) является международно признанным научно-технологическим прорывом, определившим переход к промышленной технологии изготовления ЭКБ на карбиде кремния (SiC) в мировой практике. Определяющими с точки зрения достижения экстремальных режимов и условий эксплуатации ЭКБ на SiC являются: ширина запрещенной зоны, температура Дебая, теплопроводность, критическая напряженность электрического поля, скорость насыщения дрейфа носителей.

Необходимостью формирования в России карбидокремниевой индустрии как одного из приоритетных направлений при решении задач импортозамещения электронной компонентной базы и обеспечения паритета в технологиях, определяющих научно-технологическую конкурентоспособность и безопасность государства, не вызывает сомнений.

Целью данного сообщения является обобщение комплекса работ, выполненных в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете в последние пять лет в области разработки конкурентоспособного ЭКБ на карбиде кремния в области силовой импульсной широкополосной и сверхвысокочастотной электроники. Объектами разработки являлось семейство микроключей, включая: высоковольтные дрейфовые диоды с резким восстановлением (ДДРВ), матрицы высокостабильных автоэмиссионных структур

на основе композиции «карбид кремния – нанокристаллический алмаз» и микромощные миниатюрные микромеханические коммутаторы с подвижным элементом СВЧ тракта на основе пленок карбида кремния.

### **Дрейфовые диоды с резким восстановлением**

ДДРВ диоды, реализованные впервые на кремнии до настоящего времени, являются наиболее быстрыми полупроводниковыми ключами. Время переключения определяется процессами, происходящими в базе диода, где формируется электронно-дырочная плазма, и данный процесс в первую очередь зависит от толщины базы и насыщенной скорости дрейфа основных носителей заряда. Для реализации высоковольтного сильноточного импульсного режима переключателя важны также такие параметры материала, как пробивная напряженность электрического поля, уровень легирования и распределение примесей в базе, время жизни неравновесных носителей заряда в базе диода. Последнее связано с тем, что при короткой импульсной двусторонней инжекции в базу носители не успевали бы рекомбинировать до момента их выведения из базы при переключении.

По комплексу вышеуказанных параметров, включая дополнительно ширину запрещенной зоны и, безусловно, теплопроводность, определяющую тепловые преимущества материала и, как следствие, повышение тактовой частоты следования импульсов, карбид кремния более чем на порядок превосходит кремний и уступает только алмазу.

Применительно к созданию реальной собственной карбидокремниевой ЭКБ данного типа следует отметить ОКР, реализуемую ЛЭТИ совместно с ПАО «Светлана» по заказу Минпромторга РФ, «Разработка и освоение производства линии коммутирующих элементов с наносекундными и пикосекундными временами переключения и рабочими напряжениями 30 – 3000 В (шифр «Аппарат 10»).

Образцы ДДРВ, созданные по эпитаксиальной технологии  $n^+p-p^+$ , реализованные с двумя видами защиты от пробоя (траншейного и мезаструктурного типов) имеют рабочие напряжения до 3 кВ и субнаносекундные времена переключения (600 – 900 пс) при скорости нарастания импульса напряжения  $dU/dt=(3-5)$  В/пс. Прямое падение напряжения на диодной структуре не превышало 3 В, а обратный ток при площади чипа 4 мм<sup>2</sup> находится на уровне  $10^{-8}$  А. Увеличение рабочих напряжений более 10 кВ достигалось формированием высоковольтной сборки, при этом сохранялись субнаносекундные времена переключения прибора.

### **Диодные структуры вакуумной автоэмиссионной электроники**

Современный этап развития ЭКБ характеризуется возрождением вакуумной микро- и наноэлектроники с целью достижения сверхвысоких частот ПГц – ТГц диапазона, обеспечения высокого уровня «произведения генерируемой мощности на частоту» в лампах миллиметрового и субмиллиметрового диапазона частот, решению задач коммутации и генерации в сверхкороткоимпульсной электронике и рентгеновской технике. Для вакуумной автоэмиссионной электроники также характерна радиационная и температурная стойкость.

Важнейшим элементом вакуумного прибора является источник электронов. Эффективные катоды с полевой эмиссией до настоящего времени является предметом интенсивных исследований. Карбид кремния может быть отнесен к перспективным материалам автоэмиссионной электроники и, в первую очередь, благодаря экстремальным значениям критической напряженности поля лавинного пробоя, теплопроводности и механической прочности. Дополнительными достоинствами SiC следует считать его устойчивость к химическим и радиационным воздействиям.

Данные обстоятельства позволили прогнозировать создание на основе карбида кремния микрокатодов с полевой эмиссией, сочетающих высокую плотность тока эмиссии, стабильность эмиссионных характеристик и приемлемые невысокие значения напряженности электрического поля начала эмиссии.

В рамках проведенного комплекса исследований и разработок были предложены и реализованы четыре технологических маршрута создания автоэмиссионных структур на карбиде кремния:

- формирование автоэмиссионных острий методом остро сфокусированного ионного пучка (рис. 1а);
- формирование топологически упорядоченных массивов автоэмиссионных острий методом реактивного ионно-плазменного травления с металлическим катализатором (рис. 1б);
- формирование топологически упорядоченных двухуровневых автоэмиссионных микроразмерных матриц пьедесталов с наноразмерными остриями по двухстадийной технологии, сочетающей процессы фотолитографии, реактивного ионно-плазменного травления и микромаскирования катализатором (рис. 1в);
- формирование гетероструктурных двухстадийных матриц автоэмиссионных острий на основе карбида кремния и нанокристаллического алмаза (рис. 1г).

Основой всех автоэмиссионных структур являлись монокристаллы подложки 6Н-SiC *n*-типа с удельным сопротивлением 0,05 Ом·см.

Обобщая совокупность полученных результатов, следует отметить, что в настоящий момент можно констатировать устойчивую реализацию на базе SiC микрокатодов с полевой эмиссией со следующими базовыми параметрами:

- напряжения начала эмиссии 10-15 В/мкм;
- плотность тока эмиссии до 10 А/см<sup>2</sup>;
- плотность автоэмиссионных острий 5·10<sup>8</sup>см<sup>-2</sup>;
- устойчивость работы в вакууме от 10<sup>-6</sup> до 10<sup>-9</sup> мм рт. ст.

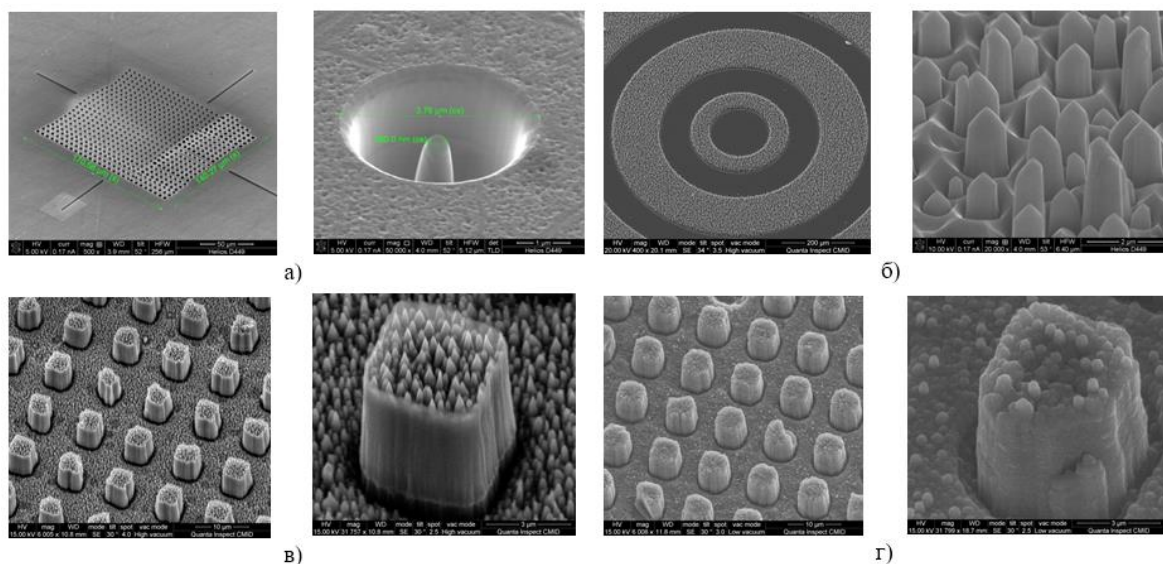


Рис. 1. Карбидокремниевые автоэмиссионные структуры, сформированные различными технологическими приемами: а) технология остросфокусированного ионного пучка; б) реактивное ионно-плазменное травление с металлическим катализатором; в) двухстадийная двухуровневая технология матриц на основе реактивного ионно-плазменного травления; г) технология гетероструктурных матриц «карбид кремния – нанокристаллический алмаз».

## Микромеханические ключи

Микромеханические ключи в настоящее время перешли в разряд традиционных устройств для сверхвысокочастотных приложений. Основное их назначение может определено как коммутация (замыкание и размыкание) линий передачи СВЧ сигналов.

По сравнению с традиционными функциональными аналогами (PIN диоды, полевые транзисторы) микроэлектромеханические ключи обладают рядом преимуществ, включая: низкие энергопотребление и вносимые потери во включенном состоянии, высокий уровень изоляции в выключенном состоянии и большая допустимая коммутируемая мощность.

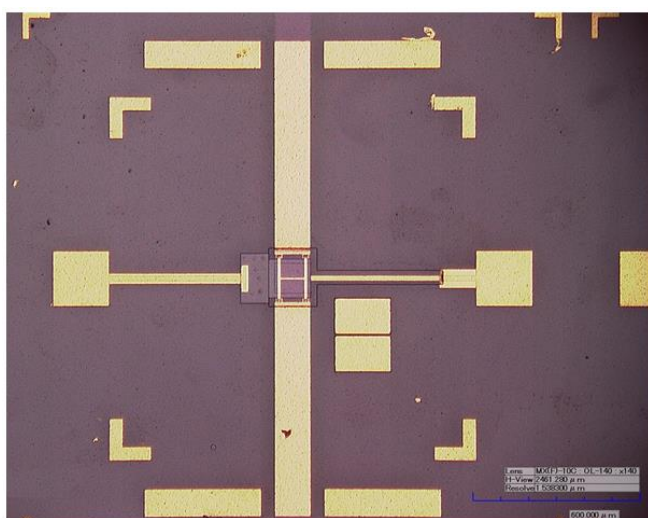
В качестве недостатков микромеханических ключей отмечались достаточно значительные времена переключения и высокое напряжение переключения, а также ограниченное число переключений.

В традиционных конструкциях микромеханических ключей в качестве материала подвешенного элемента наиболее часто используется кремний, его соединения и металлы. Применение для этих целей SiC обеспечивает ряд преимуществ:

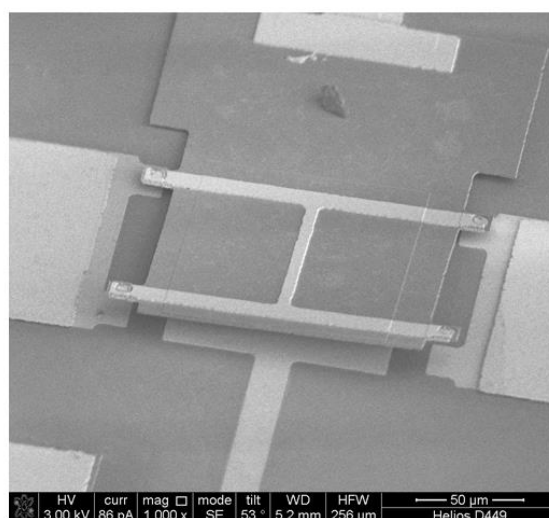
- высокое значение модуля упругости карбида кремния повышает виброустойчивость;
- низкая плотность материала (по сравнению с металлами) обеспечивает высокую резонансную частоту конструкции и, как следствие, повышает быстродействие;
- высокие значения теплопроводности и температуры Дебая, что позволяет повысить коммутируемую мощность и расширить диапазон рабочих температур.

Выполненная в ЛЭТИ разработка отечественного микроэлектромеханического ключа на основе подложки из сапфира и при использовании в качестве подвижного элемента в виде кантилевера пленки карбида кремния (рис. 2) обеспечила достижение следующих параметров микрокоммутатора:

- изоляция: >40 дБ (до 5 ГГц) и >28 дБ (от 5 до 20 ГГц);
- вносимые потери: <0,4 дБ во всем диапазоне вплоть до 20 ГГц;
- потери на отражение: <-18 дБ во всем диапазоне вплоть до 20 ГГц.
- время переключения не более 10 мкс;
- минимальное значение управляющего напряжения 13 В.



а)



б)

Рис. 2. Экспериментальный образец контактного микроэлектромеханического ключа с подвижным элементом в виде кантилевера: а) топология; б) 3D-изображение.

Данная отечественная разработка является безусловно конкурентоспособной с учетом возможности ее эксплуатации в экстремальных условиях.

## **Заключение**

В настоящее время в рамках развития научных исследований, прототипирования и организации серийного выпуска образцов новой конкурентоспособной карбидокремниевой элементной базы совместными усилиями ПАО «Светлана» и СПбГЭТУ «ЛЭТИ» формируется функционально полная технологическая линия производства экстремальной карбидокремниевой электроники.