

**Аннотация проекта (ПНИЭР), выполняемого в рамках ФЦП
«Исследования и разработки по приоритетным направлениям
развития научно-технологического комплекса России на 2014 –
2020 годы»**

**Номер Соглашения о предоставлении субсидии/государственного
контракта:** 14.574.21.0074

Название проекта: Разработка технологии получения полислоиных структур на основе синтетического монокристалла алмаза с наноразмерными функциональными областями различной проводимости для создания быстродействующих силовых высоковольтных диодов Шоттки с повышенной стойкостью к внешним воздействующим факторам

Основное приоритетное направление: Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов"

Руководитель проекта: Бормашов Виталий Сергеевич

Должность: заведующий лабораторией

E-mail: buga@tisnum.ru

Ключевые слова: силовая электроника, экстремальная электроника, радиационная стойкость, синтетические монокристаллы алмаза, диод шоттки, легирование, ионная имплантация, защитная структура

Цель проекта

Глобальной проблемой, на решение которой направлен проект, является разработка алмазных диодов Шоттки нового поколения на обратное напряжение до 1500 В и средний прямой ток до 5 А, обеспечивающих при использовании во вторичных источниках электропитания повышение КПД до уровня 90%, снижение массогабаритных показателей в 2 раза и увеличение эксплуатационной надежности на 50%.

Целью проекта является формирование научно-технического задела по созданию полислоиных структур с наноразмерными функциональными областями на основе синтетического монокристалла алмаза для изготовления силовых высоковольтных диодов Шоттки нового поколения, обеспечивающие снижение прямого падения напряжения в 1,5–2 раза и работоспособность в расширенном диапазоне температур вплоть до 250 °С.

Основные планируемые результаты проекта

В ходе выполнения научных исследований планируется получение следующих результатов:

- 1) Физико-математическая модель и ее программная реализация для описания функционирования диода Шоттки с учетом особенностей зонной структуры и электрофизических свойств синтетического алмаза. Программный модуль будет позволять рассчитывать основные электрофизические характеристики алмазных диодов Шоттки с учетом заданной топологии и физических параметров материалов. Планируется достижение высокой степени соответствия расчетных результатов с результатами экспериментальных исследований электрофизических свойств образцов алмазных диодов Шоттки с точностью не хуже $\pm 10\%$.

2) Лабораторные технологические регламенты и методики обработки алмаза, в том числе:

- методика контроля качества поверхности алмазных пластин. В качестве измеряемых параметров поверхности в методике планируется контролировать значение шероховатости, плотности дислокаций и толщины нарушенного слоя.
- методика формирования высококачественного омического контакта к алмазу с проводимостью р-типа. Планируется разработка способа получения омического контакта к алмазу, легированному бором в широком диапазоне концентраций с величиной контактного сопротивления менее $0,01 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.
- методика нанесения тонких диэлектрических покрытий с высокой диэлектрической проницаемостью на поверхность синтетического алмаза. Планируется получение плотных диэлектрических пленок с высокой диэлектрической проницаемостью (более 5) на основе оксидов переходных металлов. Критическое значение электрического поля пробоя получаемых покрытий будет более 1 МВ/см .
- методика имплантации примеси фосфора и последующего отжига радиационных дефектов для формирования областей n-типа проводимости в алмазе. Удельное электросопротивление получаемых областей при комнатной температуре ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) будет менее $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.
- методика корпусирования алмазных диодов Шоттки для надежного присоединения кристалла к металлокерамическому корпусу, разварку его электрических выводов и последующую герметизацию.

3) Эскизная техническая (конструкторская и технологическая) документация на изготовление алмазных диодов Шоттки. Экспериментальные образцы диодов, изготовленных в соответствии с разработанной документацией, будут демонстрировать:

- работоспособность образцов в диапазоне температур кристалла от минус $60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $250 \text{ }^\circ\text{C}$
- достижение при температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$ обратного напряжения не менее 1500 В с током утечки не более 100 мкА , среднего прямого тока не менее 5 А с прямым падением напряжения не более 4 В .

Краткая характеристика создаваемой/созданной научной (научно-технической, инновационной) продукции

В отличие от карбида кремния, где отечественные разработки не могут в полной мере конкурировать с изделиями зарубежных фирм, в области разработки и создания алмазных изделий Россия имеет признанный приоритет. Благодаря наличию высококачественного исходного алмазного материала в ФГБНУ ТИСНУМ в рамках выполнения государственного контракта № 11411.1000400.11.198 от 14 декабря 2011 г. уже были разработаны диоды Шоттки на основе синтетического алмаза первого поколения. Подобные диоды по уровню обратного напряжения, тока утечки, среднего прямого тока и быстродействия превосходят текущие альтернативные разработки на основе синтетического алмаза и находятся на уровне лучших мировых образцов диодов на основе карбида кремния. Основным недостатком разработанного изделия по сравнению с

конкурентами являлось высокое значение прямого падения напряжения, составляющее 8 В при прямом токе 5 А. Аналогичный уровень прямого тока в диодах на основе карбиде кремния достигается уже при напряжении порядка 2 В.

Несмотря на имеющиеся недостатки, более широкий диапазон рабочих температур алмазных диодов вплоть до 250 °С вместо 175 °С для диодов на SiC, а также существенно более высокая стойкость к воздействию спецфакторов позволяет утверждать о перспективности использования разработанного изделия для применения в высоконадежных импульсных устройствах, предназначенных для работы в экстремально жестких условиях эксплуатации.

Уменьшение прямого падения напряжения до уровня 4 В и ниже позволило бы существенно расширить область возможных применений алмазных диодов Шоттки, в том числе и в изделиях гражданского применения.

Для достижения заявленного результата в проекте планируется использовать два основных подхода. Первый из них основывается на повышении структурного качества выращиваемых эпитаксиальных алмазных слоев для увеличения критического электрического поля пробоя структуры, что позволит уменьшить толщину дрейфового слоя и, соответственно, сопротивление в открытом состоянии. Второй подход заключается в оптимизации конструкции диода, например, с помощью организации под контактом Шоттки функциональных областей противоположного типа проводимости. Это приводит к образованию серии р-п переходов, чередующихся с обычным барьером вида «металл-полупроводник». В подобной конструкции при небольшом прямом напряжении р-п переходы в основном неактивны, и прямой ток обеспечивает только контакт Шоттки. Таким образом, включающее напряжение у прибора мало, как у диода Шоттки. Мало и время выключения. Если требуются большие токи, прямое напряжение увеличивают настолько, что открываются р-п переходы, и проводимость становится биполярной.

В случае успешной реализации проекта будет достигнуто уменьшение прямого падения напряжения в 1,5–2 раза, снижение на 20-30% тока утечки, а также более чем двукратное повышение процента выхода годных по сравнению с существующими разработками алмазных диодов Шоттки. При этом будут созданы условия для сохранения достигнутого приоритета России в данной области и дальнейшей коммерциализации результатов научных исследований.

Назначение и область применения, эффекты от внедрения результатов проекта

Область применения разрабатываемых алмазных диодов Шоттки включает в себя вторичные источники электропитания, электроприводы, преобразовательные системы электроснабжения и коммутации, в том числе функционирующих при экстремальных внешних воздействиях (высокие температуры, повышенные интегральные потоки и мощности дозы ионизирующих излучений).

По сравнению с традиционными диодами на основе других широкозонных

полупроводников разрабатываемые диоды могут упростить разработку мощных корректоров коэффициента мощности, устраняя необходимость использования дополнительных демпферных диодов и большого числа вспомогательных компонентов. Это позволит уменьшить потери, ведущие к необходимости охлаждения, достигнуть существенно меньших электромагнитных помех и увеличить эффективность электронной аппаратуры.

В отличие от кремниевых диодов с p-n переходом включение и выключение алмазного диода Шоттки не сопровождаются процессами рекомбинации неосновных носителей, и, следовательно, для них характерно отсутствие токов прямого и обратного восстановления. При применении в выпрямительных узлах в силовой электронике эти свойства критически важны для построения высокоэффективных источников вторичного электропитания работающих на частотах выше 1 МГц. Такое решение позволит существенно улучшить массово-габаритные характеристики и надежность.

Также ожидается, что разрабатываемые алмазные диоды Шоттки, оптимизированные под высокочастотное выпрямление, смогут успешно заменять кремниевые сверхбыстрые диоды, применяемые сейчас в качестве антипараллельных диодов в схемах мощных преобразователей-инверторов, работающих на индуктивную нагрузку (электроприводы, установки индукционного нагрева, источники бесперебойного питания и др. мощностью свыше 500 Вт). Высокая допустимая рабочая температура кристалла (250 °С, в перспективе до 500 °С) и его высокая теплопроводность делают разрабатываемые алмазные диоды Шоттки пригодными для применения в высоконадежных импульсных устройствах, предназначенных для работы в экстремально жестких условиях эксплуатации.

Благодаря лучшим временным характеристикам и малым ёмкостям перехода, выпрямители на диодах Шоттки отличаются от традиционных диодных выпрямителей пониженным уровнем помех, поэтому разрабатываемые алмазные диоды Шоттки предпочтительны и в традиционных высоковольтных трансформаторных блоках питания аналоговой аппаратуры. Их применение в любых импульсных устройствах упростит выполнение требований электромагнитной совместимости.

Прогнозируемый социально-экономический эффект от использования результатов проекта состоит в:

- а) получении системных знаний об относительно новом материале полупроводниковой электроники, дающих возможность проектировать и создавать новые устройства на его основе;
- б) улучшении потребительских свойств и расширения областей возможного применения существующей продукции: силовых высоковольтных быстродействующих диодов Шоттки;
- в) совершенствовании и разработке новых технологических процессов изготовления структур активной и пассивной электроники на основе синтетического алмаза в направлениях снижения издержек производства и повышения качества

Текущие результаты проекта

- 1) Разработан расчетный модуль в среде Matlab для численной реализации разработанной модели и осуществления расчетов электрофизических характеристик диодов Шоттки на основе синтетического алмаза
- 2) Проведены отладка и тестирование разработанного расчетного модуля с целью проверки физической согласованности результатов расчета на тестовых структурах
- 3) С использованием разработанного модуля выполнено компьютерное моделирование для установления взаимосвязи между параметрами структуры, материалов и конструкции диода Шоттки и его характеристиками
- 4) На основе моделирования выбрана оптимальная конструкция алмазного диода с барьером Шоттки.
- 5) Разработана лабораторная методика формирования высококачественного омического контакта к алмазу с проводимостью p-типа.
- 6) Разработана лабораторная методика нанесения тонких диэлектрических покрытий с высокой диэлектрической проницаемостью на поверхность синтетического алмаза различной ориентации.
- 7) Разработана лабораторная технология синтеза из газовой фазы с целью получения воспроизводимых эпитаксиальных алмазных слоев p-типа проводимости с уровнем легирования в диапазоне от $1e15$ до $1e19$ $1/см^3$.
- 8) Разработана лабораторная методика имплантации примеси фосфора и последующего отжига радиационных дефектов для формирования наноразмерных областей n-типа проводимости в алмазе.