Сведения о выполненных работах и
полученных научных результатах в 2024 году
по проекту «**Повышение эффективности сверхбыстрых лавинных S-диодов
на основе GaAs**»,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 23-29-00053

Руководитель: канд. физ.-мат. наук Прудаев Илья Анатольевич

В проекте проведено детальное исследование, направленное на выявление факторов, приводящих к снижению эффективности коммутации лавинных S-диодов. S-диод является замыкающим электронным ключом из компенсированного GaAs и работает на принципе генерации ионизирующих дрейфующих доменов. Домены при переключении диода локализуются в области токового шнура и генерируют в нем лавинные носители, обеспечивающие высокую проводимость.

Результаты проекта показывают, что коммутационные потери в ряде случаев могут быть достаточно большими, если лавинный S-диод работает в сильноточной цепи, в которой ток ограничивается не сопротивлением нагрузки, но процессами в S-диоде. Проанализировано влияние различных механизмов рекомбинации, саморазогрев вследствие протекания тока высокой плотности, а также различных механизмов проводимости. В итоге установлено, что наибольшее влияние на эффективность коммутации оказывает неомический механизм проводимости, связанный с генерацией лавинных носителей заряда ионизирующими дрейфующими доменами. Данный механизм требует, чтобы к токовому шнуру было приложено некоторое напряжение, приводящее к лавинному размножению носителей заряда. Именно поэтому единственным способом снижения сопротивления S-диода в открытом состоянии является увеличение диаметра токового шнура (то есть увеличение его поперечного сечения). Однако, расчеты показывают, что слишком большой диаметр должен приводить к замедлению механизма генерации ионизирующих доменов. Таким образом, установлено, что существует оптимальный диаметр токового шнура, который может быть задан на практике лишь при внесении значительных изменений в конструкцию лавинного S-диода (при существующей технологии их изготовления диаметр токового шнура неуправляем и определяется случайными процессами).

В проекте впервые предложен и детально описан механизм последовательного включения токовых шнуров в компенсированном полупроводнике с глубокими центрами. Механизм подтверждается экспериментальными данными по визуализации токовых шнуров и результатами моделирования динамики перераспределения заряда на месте образования токового шнура после снятия напряжения (в условиях отсутствия тока). При моделировании решены задачи о перераспределении тепла и переносе носителей заряда в условиях захвата на глубокие центры. Установлено, что после первого включения S-диода формируется электронно-дырочная плазма и происходит захват дырок на отрицательно заряженные центры железа

(они становятся нейтральными). Электроны захватываются на нейтральные центры железа гораздо медленней, так как сечение их захвата мало. Вследствие этого второе (и последующие) переключение происходит в динамически компенсированной структуре. При этом снижение температуры и увеличение частоты коммутации сдвигает систему от равновесного заполнения ловушек, что приводит к снижению высоты энергетических барьеров на границах электронно-дырочных переходов и даже к полному исчезновению таких переходов (остаются лишь изотипные переходы на границах областей n-типа проводимости с разной степенью компенсации). Обнаруженный механизм заключается в том, что каждый последующий (после первого) токовый шнур формируется на периферии предыдущего, и это приводит к последовательному заполнению всей площади S-диода токовыми шнурами. Проводя аналогию с образованием молний, можно говорить, что в компенсированном полупроводнике две молнии всегда бьют рядом, так как оставляют после себя след — место, благоприятное для последующего разряда.

Впервые изучено влияние температуры на напряжение переключения лавинного S-диода при работе на высокой частоте. Рассмотрен эффект динамической компенсации, который оказывает влияние на напряжение переключения при увеличении температуры. Обнаружено два режима переключения. Первый режим наблюдается при пониженных температурах, когда сопротивление электронно-дырочных переходов мало и приложенное напряжение падает на слабокомпенсированной области n0-типа. Второй режим наблюдается при повышенных температурах, когда процессы захвата и выброса носителей протекают быстрее и сопротивление электронно-дырочных переходов высоко (в этом случае перед переключением напряжение падает на нем). Переход от одного режима к другому происходит при повышении температуры и приводит к снижению напряжения переключения.

Исследованные S-диоды и излучающие сборки применяются для изготовления лидаров, предназначенных для контроля трафика, оценки кругового обзора, беспилотного транспорта. Предложенная конструкция нового коммутатора, работающего на новом физическом принципе, может быть положена в основу нового типа силового переключающего прибора с повышенной эффективностью коммутации.