

Сведения о выполненных работах и
полученных научных результатах в 2023 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

Исследования сверхбыстрого переключения лавинных приборов замыкающего типа, изготовленных из GaAs, начаты более 50 лет назад. Рассматривалось более десятка различных гипотез, направленных на объяснения эффекта. Но наиболее правдоподобный механизм сверхбыстрого переключения был рассмотрен лишь в 2005 году в работах, посвященных исследованию лавинных биполярных транзисторов из GaAs. Тогда было впервые проведено численное моделирование динамики переключения с учетом отрицательной дифференциальной подвижности электронов в сильных электрических полях (превышающих 200 кВ/см). Было показано, что в приборе из GaAs возможно формирование такого состояния, при котором электронно-дырочная плазма генерируется в токовом шнуре за счет образования множественных ионизирующих доменов, каждый из которых, дрейфуя в поле, сжимается и исчезает в анодной области (сильнолегированной области коллектора – n^+ -подложке). Такой механизм получил название механизма коллапсирующих доменов (Collapsing Field Domain – CFD). Понадобилось около 15 лет, чтобы «распространить» данный механизм на остальные лавинные переключающие приборы из GaAs – нелинейные фотоэлектрические ключи из GaAs (HG PCSS), обостряющие диоды и лавинные S-диоды.

Ранее было показано, что в лавинных S-диодах, структура которых получена за счет компенсации глубокой акцепторной примесью, наблюдаются свои особенности протекания переключения по механизму CFD. Их эффективность может быть ниже эффективности лавинных биполярных транзисторов в сильноточном режиме. Данный проект направлен на детальное исследование переключения S-диодов по механизму CFD с учетом особенностей их конструкции (количества слоев в активной области, уровня легирования, и толщин слоев).

На первом этапе была разработана новая модель S-диодной структуры, включающая одномерную область проводящего канала (токового шнура) и двумерные области контактных слоев (n^+ -слоя, инжектирующего электроны; n^+ -подложки). Такой подход был предложен и реализован впервые. Он позволил использовать экспериментальные значения концентрации донорной примеси в n^+ -слое и n^+ -подложке (порядка $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Ранее, при моделировании CFD-переключения, концентрации донорной примеси завышались на порядок для исключения повышения сопротивления на торцах токового шнура (в одномерной структуре это происходило из-за отсутствия растекания тока в поперечном направлении). В данном проекте установлено, что моделирования в двумерном

приближении достаточно для исключения завышенного сопротивления при инжекции дырок в n^+ -область и инжекции электронов в n^+ -подложку. При этом во время распространения доменов в n^+ -подложке происходит трансформация их фронта из отрезка в дугу (в двумерной структуре), амплитуда доменов не превышает 700 кВ/см, они затухают на расстоянии 5 мкм от n^0 -слоя. Полученный результат позволил обоснованно исключить влияние концентрации примеси в n^+ -областях на эффективность коммутации лавинного S-диода при значении концентрации примеси более $8 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (т.е. при экспериментальных значениях).

Было проведено моделирование переключения десяти S-диодов с различной конструкцией в гидродинамическом приближении. Установлено, что увеличение толщины p^0 -слоя ведет к росту напряжения переключения и увеличению быстродействия. При этом переключение происходит более эффективно (остаточное напряжение снижается). Для детального анализа предложено провести дополнительные расчеты для двумерной модели на следующем этапе работ.

Впервые предложен и реализован подход, при котором моделирование с учетом механизма CFD проводится для двух следующих друг за другом импульсов. Таким образом, проведена оценка эффективности коммутации S-диодов на разных частотах следования импульсов. Установлено, что концентрация примеси и толщина n^0 -слоя оказывают сложное влияние при моделировании в режиме запуска двух импульсов. Увеличение толщины n^0 -слоя ведет к незначительному увеличению остаточного сопротивления S-диода в открытом состоянии при первом включении. При втором включении наличие n^0 -слоя (как и повышение концентрации доноров в нем) оказывает значительное влияние на эффективность коммутации. Второе включение инициируется в заранее сформированном канале p^0 -слоя с повышенной проводимостью (в «следе», оставшемся от перезарядки глубоких центров после первого включения). Это приводит к снижению поданного на p^0 -слой напряжения и сильному разогреву n^0 -слоя на стадии обострения второго запуска лавинного S-диода. Вследствие этого переключение по механизму CFD происходит неэффективно, так как высокая температура n^0 -слоя приводит к снижению коэффициентов ударной ионизации и общего темпа лавинной генерации носителей (CFD-домены расширяются в n^0 -слое, формируя домен малой амплитуды, обуславливающий высокое остаточное напряжение на S-диоде после переключения).

В силу того, что использованная двумерная модель в рамках гидродинамического приближения разработана впервые (как и метод моделирования CFD на сдвоенных импульсах), а результаты моделирования оказались принципиально новыми, на данном этапе нет возможности однозначно определять наиболее оптимальную конструкцию лавинного S-диода. Полученные в ходе моделирования результаты требуют экспериментальной проверки, в связи с чем, были изготовлены структуры для лавинных S-диодов. Согласно результатам моделирования выбраны те параметры, варьирование которых существенно влияет на эффективность коммутации: толщина p^0 -слоя и наличие/отсутствие n^0 -слоя.

Методами газофазной хлорид-гидридной эпитаксии и диффузии глубокого акцептора Fe изготовлены макетные образцы лавинных S-диодов с различной конструкцией. Варьируемые параметры выбраны с учетом возможности проверки их влияния на эффективность переключения и верификации построенной на первом этапе модели. Концентрация электронов в подложке составляла для всех структур $(0.8-1) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Концентрация электронов в n^+ -слое также составляла для всех структур $(0.8-1) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Всего изготовлено 8 структур с различными толщинами $p0$ -слоя ($d_n = 0-12 \text{ мкм}$) и $p0$ -слоя ($d_p = 6-25 \text{ мкм}$).

Изготовлены макетные образцы лавинных S-диодов с одинаковой конструкцией (без $p0$ -слоя и с $p0$ -слоем), но различной площадью контактов. Изготовление производилось методом «взрывной» фотолитографии. Контактные слои наносились методом электронно-лучевого испарения и электрохимическим способом. Площади контактов составляли 0.3, 0.63 и 1.44 мм².

На следующем этапе планируется проведение эксперимента и верификация построенных моделей.