

**ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ В СИЛОВЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.
РАДИАЦИОННЫЕ И ПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ
ДИНАМИКОЙ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ.
ПРОЕКТ № 15**

Координаторы: д-р физ.-мат. наук Попов В. П., д-р техн. наук Ауслендер В. Л.
Исполнители: ИФП, ИЯФ СО РАН

В работе исследовалась динамика электронно-дырочной плазмы в управляемых высоковольтных полупроводниковых приборах при высоких плотностях тока, а также методы управления этой динамикой при высокой плотности с учетом пространственной неоднородности, центров рекомбинации и неустойчивости в плазме. Проведены моделирование этих неустойчивостей, разработка методов их регулирования и оптимизации конструкции прибора. Для управления динамикой применялась как радиационная технология — регулирование времени жизни носителей методом введения рекомбинационных центров, так и полевая с помощью электрического поля — изменением формы накачивающих импульсов. Использовался электронный ускоритель серии ИЛУ, позволивший получать пучки электронов с энергией 2 МэВ для введения центров рекомбинации как исходных структур, так и корпусированных приборов, а также различные способы их переключения с линейно и синусоидально изменяющимся высоким напряжением в диапазоне 10 нс—100 мкс.

Моделирование динамики переключения трехмерных структур осуществлялось с помощью совместного решения двумерного уравнения Пуассона и уравнения непрерывности с учетом неоднородного распределения носителей заряда, их рассеяния и рекомбинации, неоднородных распределений поля и центров захвата и рекомбинации. Для $p-i-n$ -структур с низколегированным изотипным переходом показано, что кривая обратного восстановления зависит от времени жизни и концентрации свободных носителей, при ее повышении мо-

нотонность кривой нарушается и появляется пик тока, связанный с ударной ионизацией. Область ударной ионизации при высокой концентрации локализована вблизи поверхности за изотипным переходом $p^{++}-p$ и связана с разностью зарядов неравновесных носителей. Показано существование нескольких решений для таких структур, которые зависят от начальных и граничных условий (режимов переключения).

Для проведения динамических испытаний с максимальным напряжением до 5000 В и максимальным током до 120 А спроектированы и изготовлены стенды, а также проведены испытания диодных, транзисторных и тиристорных структур в виде кристаллов с прижимными контактами и корпусированных приборов с металлизацией TiNiAg. Разработаны методы экспресс-контроля напряжения лавинного пробоя и временных параметров полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, тиристоров) при их включении и выключении. Для уменьшения падения напряжения в прямом смещении предложено использовать транзисторы и диоды с малой толщиной дрейфовой области, в частности, для биполярно-полевых транзисторов (IGBT) и быстровосстанавливающихся диодов (FRD) с тонкой базой (100—200 мкм) разработана новая мембранная технология, позволяющая производить современные силовые приборы на стандартном отечественном оборудовании микроэлектронного производства. Спроектированы и изготовлены совместно с ФГУП «Восток» высоковольтные (1200 В) IGBT на ток до 50 А с падением напряжения в открытом состоянии

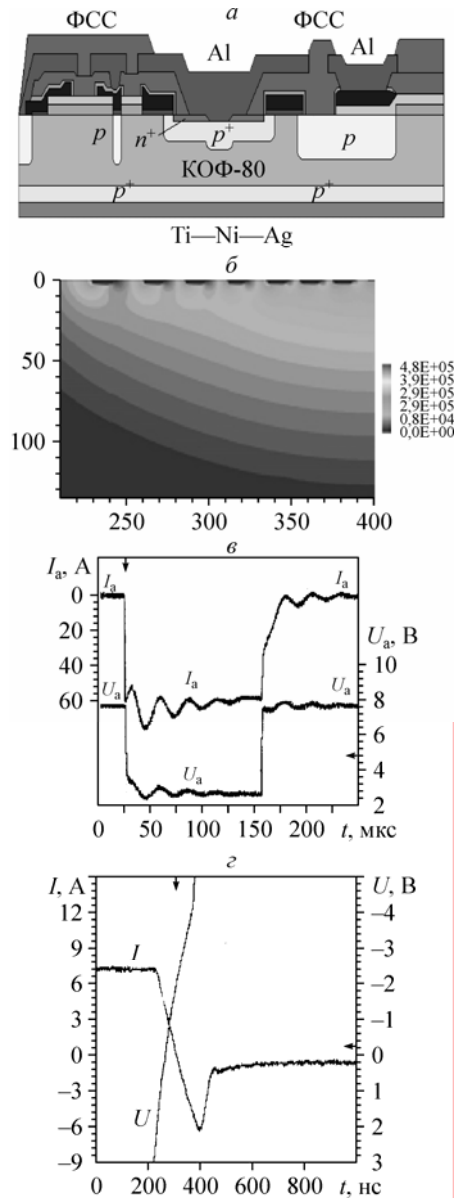
Топологическая схема части кристалла IGBT с охранной изоляцией (*a*) и расчетное распределение электрического поля на ней и в FRD при напряжении 1200 В (*б*); падение напряжения на открытом IGBT при токе 60 А (*в*); восстановление прямосмещенного FRD (*г*).

Layout of IGBT die part with guard ring (top) (*a*) and electric field distribution at the guard ring with 1200 V applied voltage (*б*); oscillogram of IGBT forward voltage drop in on-state at 60 A (*в*); oscillograms of voltage-current restores during FRD switch-off (*г*).

до 2,5 В и быстро восстанавливающиеся диоды (FRD), проведено измерение кривых обратного восстановления (см. рисунок, *a, б*). На необлученных диодах величина заряда обратного восстановления Q_{tr} составила 20 мкКл, а на облученных электронами — 0,6 мкКл. Падение напряжения в прямом направлении при токе 8 А увеличилось от 1,0 В до облучения до 2,5 В после него (см. рисунок, *в, г*).

Проведена оптимизация режимов облучения высоковольтных (до 3кВ) МОП-управляемых тиристоров. Переходная характеристика облученного тиристора с полевым управлением характеризуется отсутствием участка длинного спада тока, который сокращается до линейного со временем 3,5 мкс. Рассчитанное тепловыделение в этом случае составляет ~20 мДж, что означает уменьшение динамических потерь в два раза. При этом в два раза (до 100 А) выросла плотность управляемого тока. На основе анализа экспериментальных данных разработан критерий оценки управляемой плотности тока МОП-тиристора.

На примере моделирования, измерений и вариаций характеристик быстро восстанавливающегося диода показано, что в процессе восстановления обратносмещенного диода после прохождения тока плотностью 5×10^3 — 5×10^4 А/см² наблюдаются осцилляции тока по механизму ударной ионизации, которые позволяют создать новый прибор силовой электроники — диод semiconductor opening switch (SOS). Прибор основан на эффекте наносе-



кундного обрыва сверхплотных токов в полупроводниковых диодах. Предложена и экспериментально реализована конструкция высоковольтного (1000 В) SOS-диода, основанная на эффективной технологии диодных структур большой площади на пластинах кремния Чохральского, полученных методом водородного легирования.

Основные публикации

1. *Шереметьев А. В., Чернявский Е. В.* Исследование динамики электронно-дырочной плазмы в процессе обратного восстановления высоковольтного диода// ФТП. 2006. (В печати).
2. *Неустроев Е. П., Смагулова С. А., Антонова И. В., Сафронов Л. Н.* Формирование электрически активных центров в кремнии, облученном электронами, в интервале температур 400—700 °C// Там же. 2004. Т. 38, вып. 7. С. 852—857.
3. *Borodovskii P. A., Buldygin A. F., Tokarev A. S., Chernyavskii E. V.* Method for the microwave measurement of carrier lifetime in lightly doped silicon ingots// Russian Microelectronics Volume. 2005. V. 34, N 5. P. 316—324.