

## **ИНТЕРФЕЙС ОБМЕНА ДАННЫМИ ДЛЯ АППАРАТНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ ШИФРОВАНИЯ/РАСШИФРОВАНИЯ НА БАЗЕ FPGA КЛАСТЕРОВ**

М.В. КАЧИНСКИЙ, В.Б. КЛЮС, А.В. СТАНКЕВИЧ

Предлагается интерфейс обмена данными для систем с аппаратной реализацией алгоритмов шифрования/расшифрования данных на базе FPGA кластеров. Такие системы реализуются на ПЛИС с архитектурой FPGA и конструктивно представляют собой набор модулей (печатных узлов) с ортогональными связями между соседними микросхемами ПЛИС на печатной плате каждого модуля. Для обеспечения возможности обмена данными кластера с внешними устройствами к одной из ПЛИС также подключается системный интерфейс, в качестве которого чаще всего используется интерфейс Ethernet или USB. Для записи данных от внешнего источника через системный интерфейс в каждую ПЛИС кластера или передачи результатов обработки от каждой ПЛИС к внешнему приемнику требуется реализовать в такой системе интерфейс обмена данными.

Для решения указанных задач все ПЛИС кластера объединяются друг с другом по кольцевой схеме. Началом и концом кольца является ПЛИС, которая подключается к системному интерфейсу. Остальные ПЛИС имеют связи только с непосредственными соседями на печатной плате.

Для любых алгоритмов шифрования порядок соединения ПЛИС в кольце и физический интерфейс одинаков. Имеются отличия в логической части интерфейса, которые связаны с организацией пакетов данных. В простейшем случае пакет данных представляет собой последовательность слов, каждое из которых соответствует конкретной ПЛИС кластера. Каждая ПЛИС подсчитывает слова, проходящего через нее пакета данных, и принимает данные из нужного слова, либо устанавливает выходные данные в требуемое слово. Предложенная организация интерфейса обмена данными универсальна, поскольку настройка интерфейса на конкретную прикладную задачу заключается в модификации структуры пакетов кольцевого интерфейса без изменения приемной и передающей частей кольцевого интерфейса каждой ПЛИС кластера.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ АНОДИРОВАННОГО АЛЮМИНИЯ**

С.А. БИРАН, Д.А. КОРОТКЕВИЧ, А.В. КОРОТКЕВИЧ

Анодный оксид пленки алюминия (АОП) является перспективным материалом для производства чувствительных элементов микроэлектромеханических систем. Однако объемный рост оксида при анодировании и наличие двух материалов (Al и АОП  $Al_2O_3$ ) с разными механическими свойствами приводит к возникновению в структуре внутренних механических напряжений. Данные механические напряжения могут привести к растрескиванию образовавшейся пленки оксида в процессе изготовления и снижению чувствительности и точности измерений микроэлектромеханической системы при эксплуатации.

В данной работе приведены результаты по исследованию влияния условий получения анодных оксидных пленок на встроенные механические напряжения в структуре Al-АОП  $Al_2O_3$ . При проведении измерений использовали технически чистый алюминий марки А0 (99,9%), толщина подложки составляла 0,9 мм. Полученные образцы анодировали с 2-х сторон, после этого стравливали анодную оксидную пленку с одной стороны подложки и измеряли стрелу прогиба (S1), а затем оксид стравливали и с другой стороны и снова измеряли стрелу прогиба (S2).

В результате исследований было установлено, что при варьировании толщины оксида направление стрелы прогиба S1 изменяется: при толщине до 50 мкм пленка оксида находится

на вогнутой стороне, а при толщине оксида более 50 мкм пленка оксида — выпуклой. Это связано с тем, что при толщине оксида более 50 мкм происходит значительная пластическая деформация, которая и меняет знак внутренних механических напряжений. Величина механических напряжений, вызванных упругой деформацией структуры Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, пропорциональна разнице стрел прогиба S1 и S2. Она возрастает при увеличении толщины оксида и её зависимость от толщины оксида носит линейный характер. После второй операции травления подложки имеют остаточный изгиб. Это свидетельствует о пластической деформации в структуре АОП Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al-АОП Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, величина деформации пропорциональна стреле прогиба S2. Предложенная методика исследований позволила оценить величины как упругой, так и пластической деформаций. Показано, что их величина зависит от толщины оксида, режимов анодирования, толщины подложки, механических свойств и состава сплава алюминия.

## ДИОДЫ ШОТТКИ НА КАРБИДЕ КРЕМНИЯ

Б.С. КОЛОСНИЦЫН, Я.С. АРСИТОВ

Карбид кремния (SiC) является перспективным материалом в электронике, так как является полупроводником с непрямой зонной структурой (то есть вероятность излучательной рекомбинации в нем небольшая), с шириной запрещенной зоны от 2,4 до 3,3 эВ, что больше по сравнению с Si и GaAs, а это в свою очередь, означает больший диапазон рабочих температур (теоретически — до 1000°C, практически до — 600°C).

Карбид кремния имеет высокую теплопроводность (примерно на уровне меди), что упрощает проблему отвода тепла, снижая тепловое сопротивление кристалла по сравнению с Si в два раза и GaAs в три раза.

Диод Шоттки по сравнению с диодами на *p-n*-переходах имеют более низкое прямое падение напряжения и незначительные потери при переключении, более высокое критическое поле пробоя (у карбида кремния в 10 раз больше чем у кремния), но к сожалению такой диод не способен работать с напряжениями более 200 В.

Диоды Шоттки на карбиде кремния имеют целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными диодами Шоттки на кремнии (более широкий диапазон рабочих температур, малые утечки, более стабильные параметры при высоких температурах, малое время восстановления обратного тока), но такие структуры имеют большие токи утечки.

Значение емкостного заряда карбид-кремниевых диодов практически не зависит от скорости изменения тока, тогда как заряд обратного восстановления у кремниевых диодов увеличивается, и, соответственно, растут потери на высоких частотах.

Для уменьшения токов утечки и увеличения рабочего напряжения были предложены диоды Шоттки с *p-n*-переходом. В таких структурах локальные *p-n*-переходы дополняются контактами Шоттки.

## КРИТЕРИЙ СТАБИЛЬНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МОЩНЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Н.А. ГОНЧАРОВА, Б.С. КОЛОСНИЦЫН

Рассмотрена термоэлектрическая модель и критерий стабильности планарно-эпитаксиального высокочастотного транзистора, имеющего структуру типа «overlay».

Для получения аналитического выражения критерия стабильности с учетом шнурования эмиттерного тока, предполагается, что источник тепла (коллекторный *p-n*-переход) считается плоским и находится на поверхности из полупроводникового транзисторного чипа.

Показано, что количественную оценку критического режима работы, используя предложенный критерий, невозможно распространить на все типы биполярных транзисторов, но просматривается совпадение теоретических расчетов с результатами