

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

измерений границ устойчивости. Показано, что критерий устойчивости затруднительно использовать для расчета биполярных транзисторов средней мощности, где длина эмиттерной полоски соизмерима с шириной базы, и для микроволновых силовых транзисторов с различными архитектурами эмиттеров.

Поскольку трудно количественно оценить большинство технологических и конструктивных дефектов из косвенных экспериментальных результатов измерений, проблема индивидуальной оценки критического режима вряд ли может быть решена с помощью численных методов моделирования. В этом случае критерий дает только грубую оценку критического режима для идеальной структуры без дефектов.

## **СИНТЕЗАТОР СВЧ С ПРЯМЫМ ЦИФРОВЫМ СИНТЕЗОМ**

**В.В. МУРАВЬЁВ, Н.М. НАУМОВИЧ, С.А. КОРЕНЕВСКИЙ, А.А. СТАНУЛЬ**

Разработан синтезатор частот с прямым цифровым синтезом и умножителем частоты на петле ФАПЧ. Исследованы фазовые шумы выходного сигнала синтезатора, шумы петли ФАПЧ, уровень побочных излучений на выходах цифрового синтезатора (частота 100 МГц) и выходе умножителя частоты на петле ФАПЧ (частота 8 ГГц). Синтезатор выполнен на микросхеме 1508ПЛА8Т. Сетка частот формируется в диапазоне частот 100 МГц. Для формирования сетки частот в диапазоне частот 8–9 ГГц, использован умножитель частоты на петле ФАПЧ. Экспериментальные исследования шумовых характеристик на выходе петли ФАПЧ проведены при использовании в качестве опорного сигнала синтезатора с прямым цифровым синтезом и малошумящего генератора «ТЕМЕХ ULN HF В». Малошумящий генератор «ТЕМЕХ ULN HF В» обеспечивает значение фазовых шумов минус 100 дБ/Гц, при отстройке от несущей на 1 кГц. Использование в качестве опорного генератора петли ФАПЧ синтезатора частот с прямым цифровым синтезом на микросхеме 1508ПЛА8Т приводит к увеличению фазовых шумов выходного сигнала СВЧ до минус 87 дБ/Гц, при отстройке от несущей на 1 кГц, и 92 дБ/Гц, при отстройке от несущей на 10 кГц.

## **ФОРМИРОВАТЕЛЬ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ**

**В.В. МУРАВЬЁВ, С.А. КОРЕНЕВСКИЙ, К.А. КОСТЮКЕВИЧ, А.А. СТАНУЛЬ**

Применение широкополосных сигналов позволяет обеспечить высокую скрытность и помехозащищенность радиоэлектронных систем. В настоящее время имеется большое количество микросхем, позволяющих осуществить формирование широкополосных сигналов методом прямого цифрового синтеза. В работе исследован формирователь широкополосных сигналов, выполненный на микросхеме 1508ПЛА8Т.

Экспериментальные исследования проведены при формировании сигнала с линейной частотной модуляцией. Разработанный формирователь имеет следующие характеристики:

- полоса частот формируемого широкополосного сигнала с ЛЧМ — 150 МГц;
- количество разрядов АЦП формирователя — 10;
- уровень внеполосных излучений при переносе спектра сигнала на частоту 8 ГГц не превышает минус 50 дБс;
- уровень побочных излучений при формировании гармонического колебания с частотой 100 МГц, менее минус 82 дБс;
- частота дискретизации — 1 ГГц.

В формирователе предусмотрен прием сигналов управления, позволяющих обеспечить:

- необходимые значения начальной и конечной частоты генерируемого широкополосного сигнала;

- период повторения, амплитуду и начальную фазу формируемого выходного сигнала;