

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ СВЧ MESFET-ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

М. Черных

Уникальные свойства карбида кремния (SiC) обеспечивают характеристики, недостижимые для кремниевых приборов, а именно: высокие пробивные напряжения (более 1 кВ), стойкость к воздействию ионизирующих излучений, широкий диапазон рабочих температур. Кроме того, карбид кремния химически инертен, что позволяет применять бескорпусные SiC-приборы в агрессивных средах. Развитие технологии выращивания монокристаллов SiC модифицированным методом Лели и процессов химического осаждения из паровой фазы для формирования эпитаксиальных структур на SiC-подложке позволило добиться существенных успехов в создании высокоэффективных силовых и СВЧ-приборов на основе SiC, в частности, мощных MESFET-транзисторов [1, 2]. Рассмотрим ключевые факторы, определяющие выбор конструктивно-технологических параметров мощных СВЧ MESFET-транзисторов на основе SiC, и оценим влияние этих параметров на величину паразитных емкостей приборов.

ВАРИАНТЫ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИСПОЛНЕНИЯ MESFET-ТРАНЗИСТОРА

Полевые транзисторы с барьером Шоттки, или MESFET (Metal-Semiconductor Field Effect Transistor), – самый распространенный тип мощных СВЧ-транзисторов на основе карбида кремния. Для создания таких приборов используются полуизолирующие подложки карбида кремния, на которых методом эпитаксиального выращивания формируются буферный слой р-типа и каналный слой n-типа (рис.1). Часто эпитаксиальная структура для создания MESFET-транзисторов содержит дополнительно n+ слой для формирования омических контактов к областям стока и истока [3]. Альтернативный способ получения омических контактов – легирование каналного слоя под контактной металлизацией. В качестве контактного металла

применяют никель или титан [4]. Затвор и каналный слой n-типа образуют переход Шоттки. Область пространственного заряда от обратно смещенного

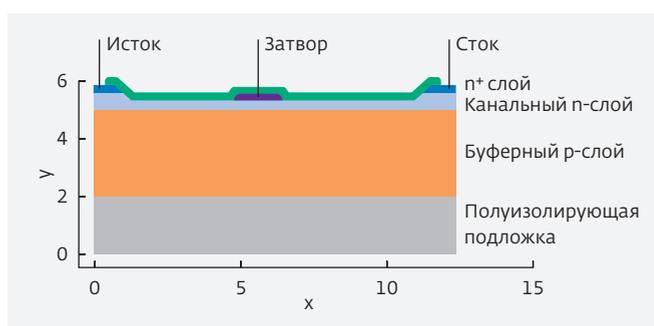


Рис.1. Двумерная модель MESFET-транзистора на основе карбида кремния

контакта Шоттки перекрывает каналный n-слой вплоть до буферного p-слоя, тем самым закрывая транзистор. В качестве материала затвора часто используют никель, титан или молибден.

Влияние параметров канального и буферного слоев на статические характеристики MESFET-транзистора рассмотрено в [5, 6]. В этих работах показано, что поведение MESFET-транзистора определяется в основном соотношением уровня легирования и толщины канального и барьерного слоев. Данное соотношение определяет эффективную толщину канала транзистора и наличие или отсутствие утечек через буферный слой. В зависимости от этого соотношения можно выделить четыре варианта конструктивно-технологического исполнения прибора.

- **Высокий уровень легирования канальной области при малой толщине и/или низком уровне легирования буферного слоя.** Ключевая особенность данного конструктивно-технологического исполнения транзистора – утечка сквозь буферный слой вплоть до полуизолирующей подложки. Такой вариант исполнения характеризуется максимальной проводимостью канала MESFET-транзистора (для заданных значений параметров канальной области) из-за глубокого обеднения буферной

области и протекания в ней тока. В режиме отсечки канала наблюдается существенная зависимость тока стока транзистора от приложенного между стоком и истоком напряжения, что будет негативно влиять на линейность транзистора. Необходимо учитывать, что при таком соотношении параметров транзистора пороговое напряжение также будет зависеть от напряжения питания. Кроме того, на работу прибора сильно влияет качество полуизолирующей подложки и переходных слоев в эпитаксиальной структуре. При наличии любых дефектов в этих элементах возможны появление утечек при закрытом канале транзистора, а также преждевременный пробой транзисторной структуры. Использование в качестве подложки компенсированного карбида кремния (вместо особо чистого) в условиях повышенных температур или воздействия ионизирующего излучения может привести к возникновению проводимости в полуизолирующем слое, что вызовет сбой функционирования транзистора из-за ухода значений порогового напряжения и смещения передаточной характеристики.

- **Высокий уровень легирования канальной области при соотношении уровня легирования**

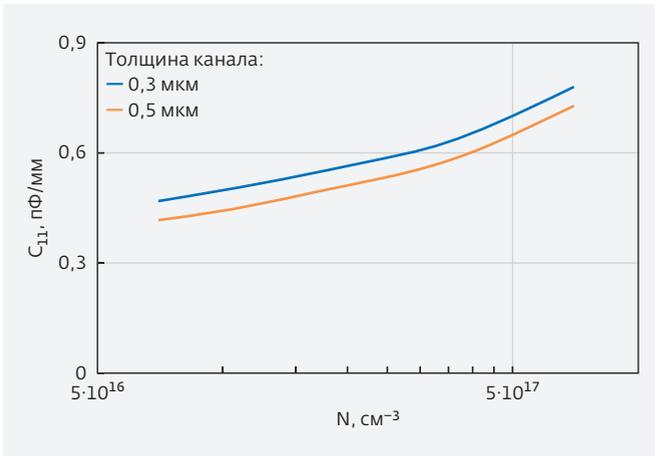


Рис.2. Зависимость входной емкости от уровня легирования канальной области

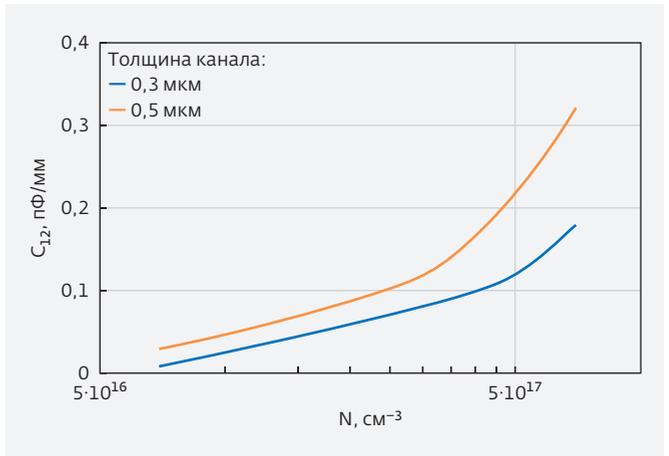


Рис.4. Зависимость проходной емкости от уровня легирования канальной области

и толщины буферного слоя, не допускающего протекания тока до полуизолирующей подложки при данном напряжении питания. При таком конструктивном исполнении утечки через буферный слой MESFET-транзистора сохраняются, но исключены негативные эффекты, вызванные влиянием полуизолирующей подложки и переходного участка между подложкой и буферным эпитаксиальным слоем. Как и в первом случае, для данного исполнения характерна зависимость порогового напряжения от напряжения питания транзистора. На ток стока влияет напряжение между стоком и истоком в режиме отсечки канала, но эта зависимость менее выражена и снижается по мере увеличения уровня легирования буферного слоя при неизменном уровне легирования канального слоя. Это конструктивно-технологическое исполнение

MESFET-транзистора можно назвать компромиссным. С одной стороны, меньшие, чем в первом случае, но достаточно большие токи насыщения транзистора, а с другой – применение такого подхода позволяет исключить влияние полуизолирующей подложки на свойства MESFET-транзистора.

- **Уровень легирования и толщина канальной и буферной областей, при которых отсутствуют утечки через буферный слой.** Данный тип конструктивно-технологического исполнения MESFET-транзистора характеризуется меньшими токами насыщения, чем два предыдущих. В отличие от первого и второго типов, в этом случае пороговое напряжение не зависит от напряжения питания транзистора и отсутствует зависимость тока стока от напряжения между стоком и истоком в режиме отсечки транзистора. Это обеспечивает лучшую

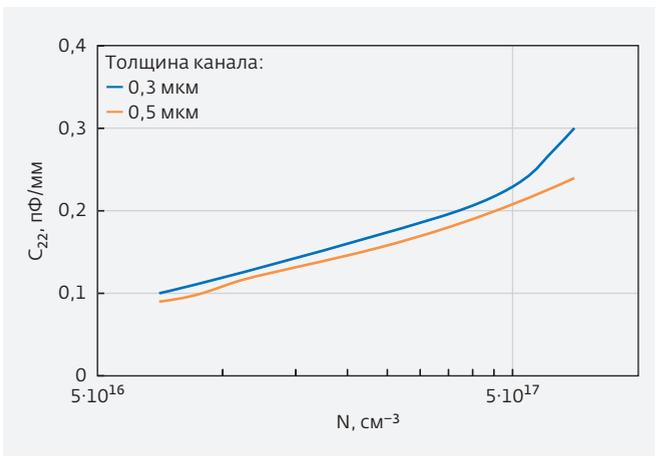


Рис.3. Зависимость выходной емкости от уровня легирования канальной области

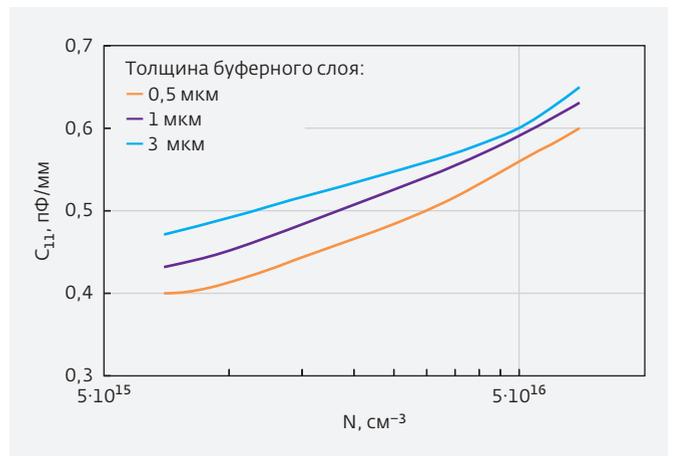


Рис.5. Зависимость входной емкости от уровня легирования буферной области

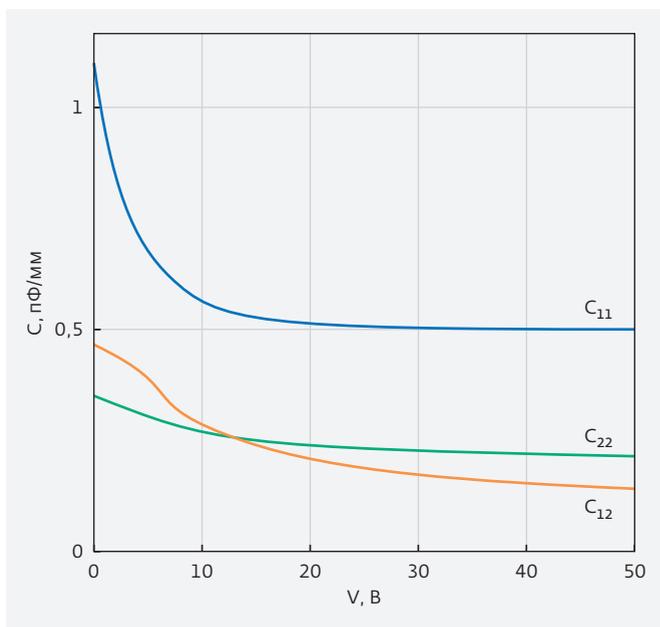


Рис.6. Зависимости входной, выходной и проходной емкостей от напряжения на стоке при заземленном истоке

линейность и стабильность работы транзистора на большом сигнале. При использовании данного типа конструктивно-технологического исполнения при проектировании MESFET-транзистора можно добиться достижения пробивных напряжений выше 500 В.

- **Низкий уровень легирования и/или малая толщина канального слоя и высокий уровень легирования буферного слоя.** При таком типе конструктивно-технологического исполнения из-за распространения области пространственного заряда от р-п-перехода "канальный слой – буферный слой" в глубину канального слоя и полного его перекрытия MESFET-транзистор будет представлять собой нормально закрытый прибор. В зависимости от конечного применения MESFET-транзистора можно выбрать оптимальное сочетание

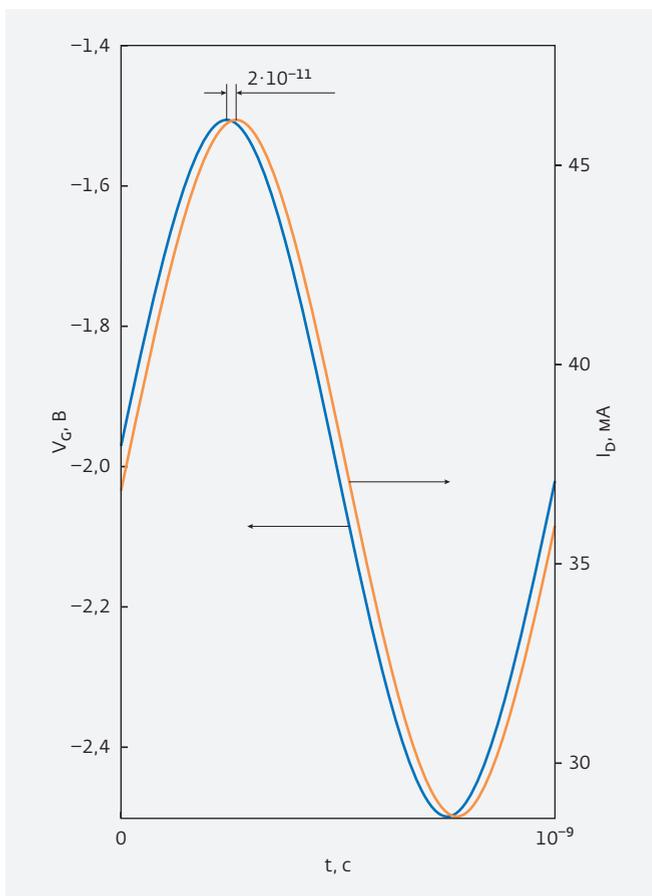


Рис.7. Запаздывание тока стока от синусоидального изменения напряжения на затворе

технологических параметров канального слоя для достижения минимальных сопротивления и подвижности в канале, крутизны или пробивного напряжения между стоком и истоком и порогового напряжения. При этом по мере уменьшения сопротивления канала за счет увеличения уровня легирования канального слоя уменьшается пробивное напряжение и снижается подвижность основных носителей в канале транзистора.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАЗИТНЫХ ЕМКостей MESFET-ТРАНЗИСТОРА

Важная задача при проектировании мощных СВЧ MESFET-транзисторов – минимизация паразитных емкостей прибора. С целью оптимального выбора параметров канального и буферного слоев было проведено компьютерное моделирование паразитных емкостей MESFET-транзистора, рассчитанного для применения в СВЧ-технике. Параметры эпитаксиальных слоев выбирались исходя из условия отсутствия утечек. Расчет проводился при уровне легирования канального слоя, составляющем около 10^{17} см^{-3} .

В таких условиях можно получить сравнительно низкое сопротивление канала транзистора при небольшой толщине канального эпитаксиального слоя. Известно, что подвижность основных носителей в карбиде кремния резко снижается при высоких уровнях легирования [7]. Концентрация легирующей примеси порядка 10^{17} см^{-3} позволяет сохранять достаточную подвижность носителей для применения таких структур в СВЧ-электронике. Толщина канального слоя была выбрана так, чтобы обеспечить пороговое напряжение транзистора на уровне около -10 В .

Моделирование выполнялось с использованием САПР Sentaurus TCAD. Для расчетов была создана двумерная конструктивная модель MESFET-транзистора (см. рис.1). При электрофизическом моделировании учитывались такие особенности карбида кремния, как анизотропия свойств и неполная ионизация примеси.

В результате моделирования были получены зависимости паразитных емкостей транзистора от уровня легирования канальной и буферной областей. При повышении уровня легирования основная составляющая входной емкости – собственная емкость перехода Шоттки – растет из-за увеличения количества носителей заряда в канале MESFET-транзистора, а также из-за уменьшения толщины области пространственного заряда под затвором Шоттки (рис.2). По мере увеличения толщины канала уменьшается емкостная связь затворного металла с буферным слоем, что, в свою очередь, сказывается на значении входной емкости.

Зависимости выходной и проходной емкостей от уровня легирования канального слоя также носят возрастающий характер (рис.3, 4). Повышение емкости в обоих случаях обуславливается увеличением количества свободных носителей в объеме канального слоя.

Изменение уровня легирования буферной области пренебрежимо мало влияет на выходную и проходную емкости транзистора. В отличие от них входная емкость имеет ярко выраженную зависимость от параметров буферного слоя. Входная емкость заметно возрастает при повышении уровня легирования и увеличении толщины буферной области MESFET-транзистора (рис.5).

В процессе моделирования была также рассчитана зависимость входной, выходной и проходной емкостей от напряжения на стоке при заземленном по постоянному току истоке (рис.6). Для оценки быстродействия MESFET-транзистора моделировалась реакция тока стока при напряжении питания 50 В в схеме с общим истоком на синусоидальное изменение напряжения на затворе амплитудой

1 В и частотой 1 ГГц . На затвор подавалось напряжение смещения -2 В , что соответствует работе транзистора в режиме усиления по классу А. Запаздывание тока стока от управляющего сигнала составило $2 \cdot 10^{-11} \text{ с}$ (рис.7). Следует отметить, что используемая модель не учитывает паразитные индуктивности проводочных выводов и корпуса транзистора, значительно искажающие сигнал.

* * *

Таким образом, для минимизации паразитных емкостей мощных СВЧ MESFET-транзисторов необходимо снижать уровни легирования в канальной и буферной областях, а также уменьшать толщину буферного слоя, сохраняя при этом оптимальные соотношения данных параметров. Выбор конструктивно-технологических параметров эпитаксиальных слоев мощных СВЧ MESFET-транзисторов должен определяться исходя из конкретных задач проектирования с учетом приведенных в статье рекомендаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лебедев А., Сбруев С.** SiC-электроника. Прошлое, настоящее, будущее // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2006. № 5.
2. *Advances in Silicon Carbide. Processing and Applications.* Edit by S. E. Saddow, A. Agarwal. – Artech House, Inc., 2004, 218 p.
3. **Гудков В., Мокеев А., Земляков В. и др.** Полевой транзистор с затвором Шоттки на основе 4H-SiC и оценка его СВЧ-характеристик // Электронная техника. 2007. Вып. 3 (491). (Серия: СВЧ-техника).
4. **Бланк Т., Гольдберг Ю., Поссе Е., Солдатенков Ф.** Механизм протекания тока в омическом контакте к n-4H-SiC // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44. Вып. 4.
5. **Черных М., Цоцорин А., Кожевников В.** Моделирование влияния технологических параметров формирования канального слоя на электрические характеристики мощного СВЧ полевого карбид-кремниевый транзистора Шоттки // Вестник Воронежского государственного университета. 2015. № 2. (Серия: Физика, Математика).
6. **Черных М., Цоцорин А., Кожевников В.** Моделирование влияния параметров буферного слоя на статические характеристики мощных СВЧ транзисторов с затвором Шоттки на основе карбида кремния // Электронная техника. 2015. Вып. 2–3 (236–237). С. 70–80. (Серия 2. Полупроводниковые приборы).
7. **Мнацаканов Т., Поморцева Л., Юрков С.** Полуэмпирическая модель подвижности носителей заряда в карбиде кремния для анализа ее зависимости от температур и легирования // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 35. Вып. 4.