

М.И. Черных^{1,2}, А.Н. Цоцорин¹, В.А. Кожевников¹

¹ОАО «Научно-исследовательский институт электронной техники»

²Воронежский Государственный Университет

Исследование воздействия высоких температур на электрофизические свойства мощных СВЧ транзисторов с затвором Шоттки на основе карбида кремния

Проведено моделирование температурного воздействия на мощные СВЧ транзисторы с затвором Шоттки на основе карбида кремния. Представлены основные негативные фактора воздействия высоких температур. Приведены зависимости основных параметров транзистора от температуры. Представлена зависимость градиента температур от толщины подложки.

Ключевые слова: карбид кремния, моделирование полупроводниковых приборов, СВЧ транзисторы, высокотемпературная электроника

В минувшее десятилетие возрос интерес к мощным СВЧ транзисторам на основе широкозонных полупроводников, таких как карбид кремния и нитрид галлия. Приборы, созданные на основе данных полупроводников, не только обладают электрофизическими характеристиками, превосходящими характеристики транзисторов, созданных на основе традиционных полупроводниковых материалов, таких как кремния и арсенид галлия, но и обладают большей стойкостью к внешним воздействиям высоких температур и радиации. С точки зрения термической стабильности мощных СВЧ транзисторов наиболее перспективным видится применения карбида кремния, в качестве основы для их создания. Одним из распространенных типов мощных СВЧ транзисторов на основе карбида кремния является полевой транзистор с затвором Шоттки (ПТШ). Данный тип приборов создается на эпитаксиальных структурах, сформированных на полуизолирующей подложке карбида кремния с высоким удельным сопротивлением порядка 10^9 Ом·см. Эпитаксиальная структура, в общем случае, содержит буферный слой р-типа проводимости, каналный слой n-типа проводимости и высоколегированный слой n+ типа для формирования омических контактов к областям стока и истока [1, 2].

Для анализа поведения ПТШ при воздействии высоких температур было проведен ряд виртуальных экспериментов в программном комплексе Sentaurus TCAD. Была создана конструктивная модель прибора, рассчитанная на питание 50 В. Параметры эпитаксиальных слоев выбирались таким образом, чтобы обеспечить пороговое напряжение транзистора 11,7 В и пробивное напряжение между стоком и истоком при закрытом канале транзистора более 100 В при температуре 300 К. Для упрощения приведения данных, ширина затвора выбрана 1 мм. Моделирование электрофизических свойств при температурном воздействии проводилось в два этапа. На первом этапе расчет проводился без учета саморазогрева активной области транзисторной структуры. На данном этапе температура ПТШ считалась константой в пределах одного виртуального эксперимента и проводилось моделирование только активной области кристалла транзистора. На втором этапе моделирования вводился учет саморазогрева активной области кристалла транзисторной структуры и добавлялась термодинамическая модель распределения температуры кристалла. При этом структурная

ячейка транзистора моделировалась полностью, вместе с полуизолирующей подложкой. Моделирование было проведено для различных толщин подложек от 300 мкм, соответствующей не утоненной подложке карбида кремния, до 100 мкм. В данном виртуально эксперименте изменялась изначальная температура структуры и температура теплоотвода, подведенного к подложке ПТШ.

На первом этапе был проведен расчёт влияния температуры среды на пороговое напряжение и сопротивление канала ПТШ. Главными факторами, определяющими изменение указанных характеристик при различных значениях температуры среды является генерация носителей заряда в канале и буферном слое транзистора, а так же изменение сопротивления канала транзистора из-за разогрева кристаллический решетки. При возрастании температур окружающей среды пороговое напряжение плавно увеличивается. Зависимость изменения порогового напряжения от температуры представлена на рисунке 1.

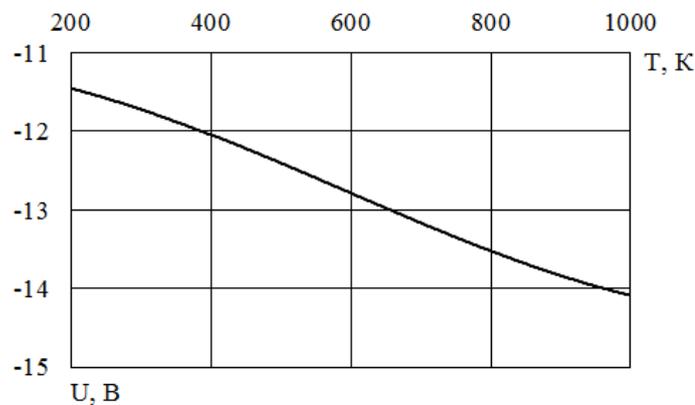


Рисунок 1. Зависимость порогового напряжения ПТШ от температуры среды

Зависимость сопротивления канала транзистора от температуры представлена на рисунке 2. Полученная зависимость хорошо коррелирует с моделью изменения подвижности носителей от температуры предложенной в [Т.Т. Мнацаканов, Л.И. Поморцева, С.Н. Юрков ФТП, 35, 406 (2011)]. Сопротивление транзистора резко возрастает с увеличением температуры среды. Уже при 600 К сопротивление транзистора более чем 5 раз превышает сопротивление при 300 К.

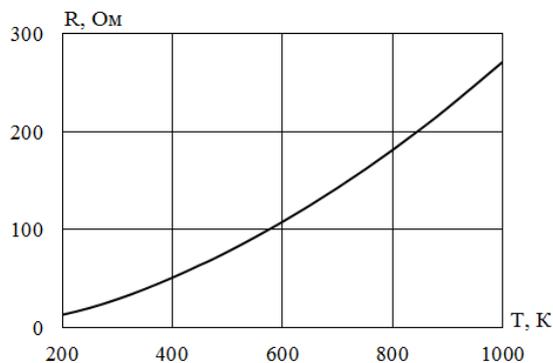


Рисунок 2. Зависимость сопротивления ПТШ от температуры среды

При введении в расчет термодинамической модели и модели саморазогрева активной области кристалла было проведено моделирование работы приборы при 300 К. На рисунке 3

показано распределение температуры в кристалле ПТШ при различной толщине полуизолирующей подложки при саморазогреве структуры при статическом режиме работы при напряжении питания 50 В и нулевом смещении на затворе. За начало координат выбран контакт подложки кристалла и теплоотвода. Модель подразумевает теплоотвод идеальным, то есть температура края подложки кристалла остается неизменной. Наибольший разогрев структуры происходит в области канала ПТШ со стороны стока транзистора. В указанной области за счет обеднения канального слоя образуются участки с наибольшим сопротивлением, что вызывает локальное увеличение температуры.

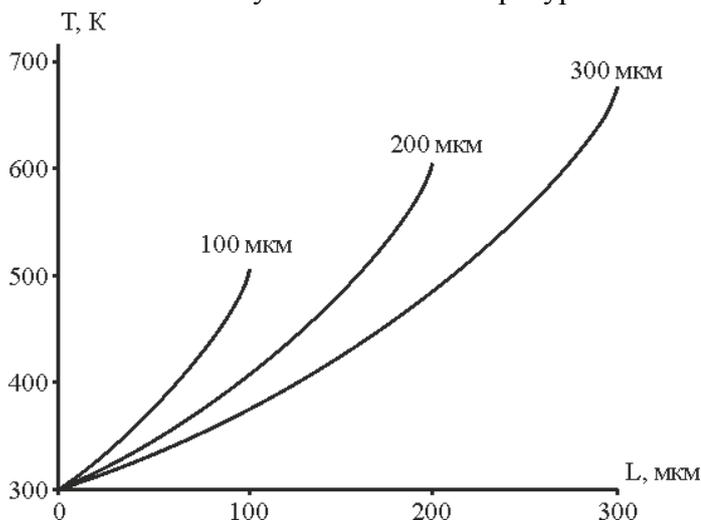


Рисунок 3. Распределение температуры в ПТШ при различной толщине подложки

Разогрев транзисторной структуры приводит к снижению проводимости канала ПТШ. Что в свою очередь снижает ток стока в режиме насыщения транзистора. На рисунке 4 показаны выходные вольтамперные характеристики ПТШ с учетом саморазогрева структуры для подложки 300 мкм и 100 мкм соответственно.

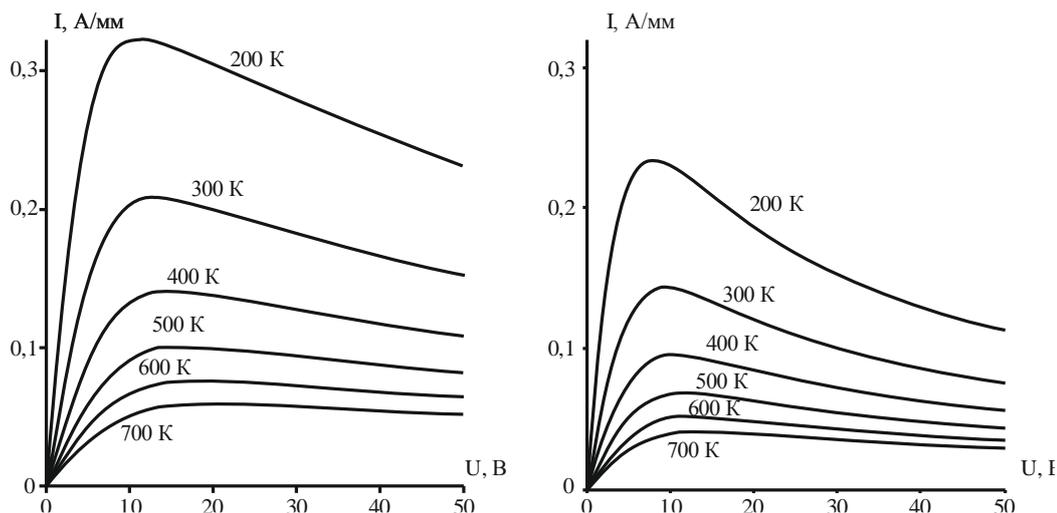


Рисунок 4. Выходные вольтамперная характеристика ПТШ с учетом саморазогрева структуры при различных значениях температуры окружающей среды и теплоотвода. Слева толщина подложки 100 мкм, справа – 300 мкм

Как видно из рисунка 4 ПТШ сформированные на неутоненной подложке уступают по токам насыщения в полтора раза ПТШ сформированных на утоненной до 100 мкм подложке. Кроме того, максимальная температура при саморазогреве ПТШ сформированного на подложке толщиной 300 мкм более чем на 100 К превышает максимальную температуру саморазогрева ПТШ сформированного на утоненной до 100 мкм подложке.

ПТШ на основе карбида кремния показывают высокую работоспособность при повышенных температурах активной области кристалла вплоть до 1000 К. При работе в статическом режиме ПТШ приведенной конструкции выделяет большое количество тепла. Это обусловлено высоким сопротивлением канальной области в режиме насыщения транзистора. Не смотря на высокую теплопроводность карбида кремния, при использовании неутоненной подложки толщиной 300 мкм, отвод тепла от активной области транзистора происходит неэффективно, что приводит к сильному разогреву транзисторного кристалла. Данный эффект можно минимизировать используя в качестве подложки утоненные до 100 мкм пластины полуизолирующего карбида кремния. Это позволяет уменьшить максимальную температуру активной области кристалла ПТШ в статическом режиме более чем на 100 К.

Библиографический список

1. Ji-Hak Jung Fabrication of SiC MESFET's for Microwave Applications/ Ji-Hak Jung, Hoon Park, Jin-Kuk Park, Hyun-Chang Park // Journal of the Korean Physical Society. – 2002 – Vol. 40, No. 4 .–P. 588-591.
2. Гудков В.А. Полевой транзистор с затвором Шоттки на основе 4H-SiC и оценка его СВЧ-характеристик/ Гудков В.А., Мокеев А.С., Земляков В.Е., Васильев В.И., Растегаев В.П., Шаповал С.Ю. // Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника – 2007 – вып.3 – С. 3-9.
3. Sentaurus Device User Guide // Version I-2013.12.
4. Мнацаканов Т.Т. Полуэмпирическая модель подвижности носителей заряда в карбиде кремния для анализа её зависимости от температур и легирования/ Мнацаканов Т.Т., Л.И. Поморцева, С.Н. Юрков // Физика и техника полупроводников – 2011 – том 35, вып. 4 – С. 406-409.