

Зависимость пробивного напряжения ПТШ на основе GaAs от геометрических параметров структуры транзистора

Зубков А. М., Гарбер Г. З.

При моделировании на ЭВМ работы полевых транзисторов с барьером Шоттки на арсениде галлия найдена связь пробивного напряжения сток-исток с взаимным расположением затвора и стенок углубления под канал транзистора. Меняя геометрические параметры поперечного сечения структуры транзистора, можно существенно повысить его пробивное напряжение, уменьшая при этом паразитное сопротивление истока.

Введение

Одним из путей повышения отдаваемой мощности СВЧ полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТШ) является повышение пробивного напряжения сток-исток. Еще в 1978 году сотрудниками НИИ «Пульсар» был предложен способ повышения пробивного напряжения СВЧ ПТШ на арсениде галлия путём формирования углубления под канал с плавными боковыми стенками [1], что уменьшает максимальную напряжённость поля в пространстве между стоком и затвором транзистора. С тех пор формирование подобной структуры для мощных СВЧ ПТШ, получившей название “graded recess structure” - плавно углубленная структура, широко используется во всем мире (например [2]). Повсеместное распространение получила структура с двойным углублением, приведённая на рис. 1. Однако результаты систематического исследования зависимости пробивного напряжения ПТШ от геометрических параметров такой структуры не опубликованы, возможно, из-за большой трудоёмкости проведения исследований экспериментальным путём.

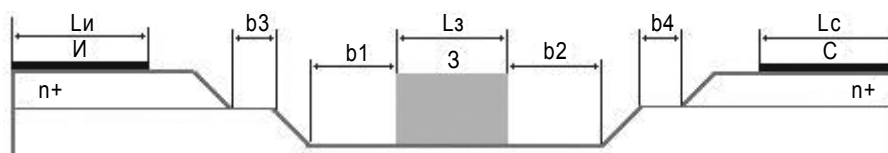


Рис. 1.

Геометрические параметры структуры ПТШ

Ситуация изменилась после разработки программы двумерного моделирования полевых транзисторов с учётом лавинного умножения [3]. В работе [4] изучалось зарождение пробоя барьера Шоттки в пространстве затвор-сток при токах затвора много меньших тока стока ПТШ. Вместе с тем известно, что в интересных для практики случаях пробивное напряжение сток-исток мощных СВЧ ПТШ на арсениде галлия при напряжении затвор-исток, близком к напряжению отсечки, существенно превосходит напряжение начала пробоя пространства затвор-сток.

Целью настоящей работы является изучение зависимости пробивного напряжения сток-исток почти закрытых СВЧ ПТШ на арсениде галлия при уровне избыточного тока стока в состоянии пробоя, соизмеримом с начальным током стока (так называется

ток стока при напряжении затвор-исток, равном нулю, вблизи перехода вольт-амперной характеристики сток-исток от крутого участка к плавному).

СВЧ ПТШ изготавливают на эпитаксиальных структурах, поверхность которых ориентирована по плоскости (1 0 0). При формировании углубления под канал используют селективный жидкостной травитель, в котором скорость травления арсенида галлия сильно зависит от кристаллографического направления. При ориентации затворной канавки в плоскости (1 0 0) вдоль направления (0 1 1) боковые стенки углубления получаются плоскими и составляют угол 55° с основанием. Эта технология формирования структуры типична при создании СВЧ ПТШ. Именно такой случай и рассматривается в данной работе.

Результаты моделирования

При моделировании работы ПТШ длина затвора $L_z = 0,5$ мкм, толщины эпитаксиальных слоёв $n^- - n - n^+$ и канала под затвором оставались неизменными, а параметры b_1, b_2, b_3, b_4 (рис. 1) варьировались. Напряжение смещения затвор-исток было постоянным и таким, что при смещении сток-исток $U_c = 5$ В ток стока составлял примерно 0,1 от начального тока стока. Такой режим был выбран потому, что при правильном проектировании мощных СВЧ усилителей на ПТШ рабочая точка в каждом периоде СВЧ колебаний заходит в область больших напряжений стока именно при малых токах стока, когда разность потенциалов между затвором и стоковым концом канала под затвором приближается к напряжению отсечки.

1. Моделирование структур ПТШ на основе GaAs с одинарным углублением и различными расстояниями b_1 и b_2

Сначала изучались вольт-амперные характеристики структур с различными расстояниями b_1 и b_2 при одинарном углублении в районе затвора. Геометрические параметры моделируемых структур показаны на рис. 2.

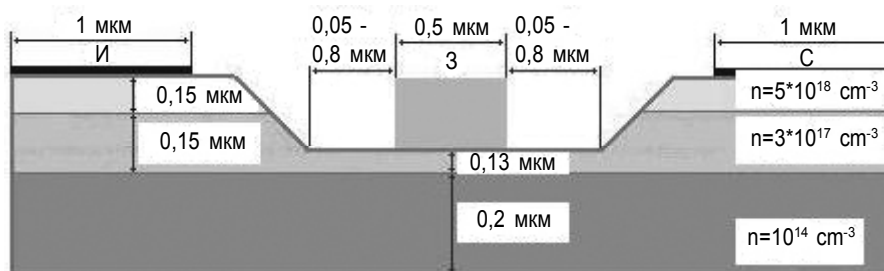


Рис. 2.

Симметричная структура GaAs с одинарным углублением

Полученные результаты приведены на рис. 3 и 4. За критерий пробоя взято превышение тока стока (I_c) в состоянии пробоя над его значением до пробоя на 5 мА (рис. 3), что составляет примерно 20% от величины начального тока. При этой разнице наблюдается резкое возрастание тока стока.

Зависимость пробивного напряжения от расстояния b_2 между затвором и стоковой границей углубления показана на рис. 4. Видно, что пробивное напряжение монотонно возрастает с увеличением b_2 . Причём при малых значениях b_2 пробивное напряжение

катастрофически падает ($U_{пр} = 2,5$ В при $b_2 = 0,05$ мкм). Столь малое пробивное напряжение характерно для некоторых малозумящих СВЧ ПТШ, изготовленных по технологии самосовмещения затвора, когда затвор предельно приближается к боковой стенке затворной канавки.

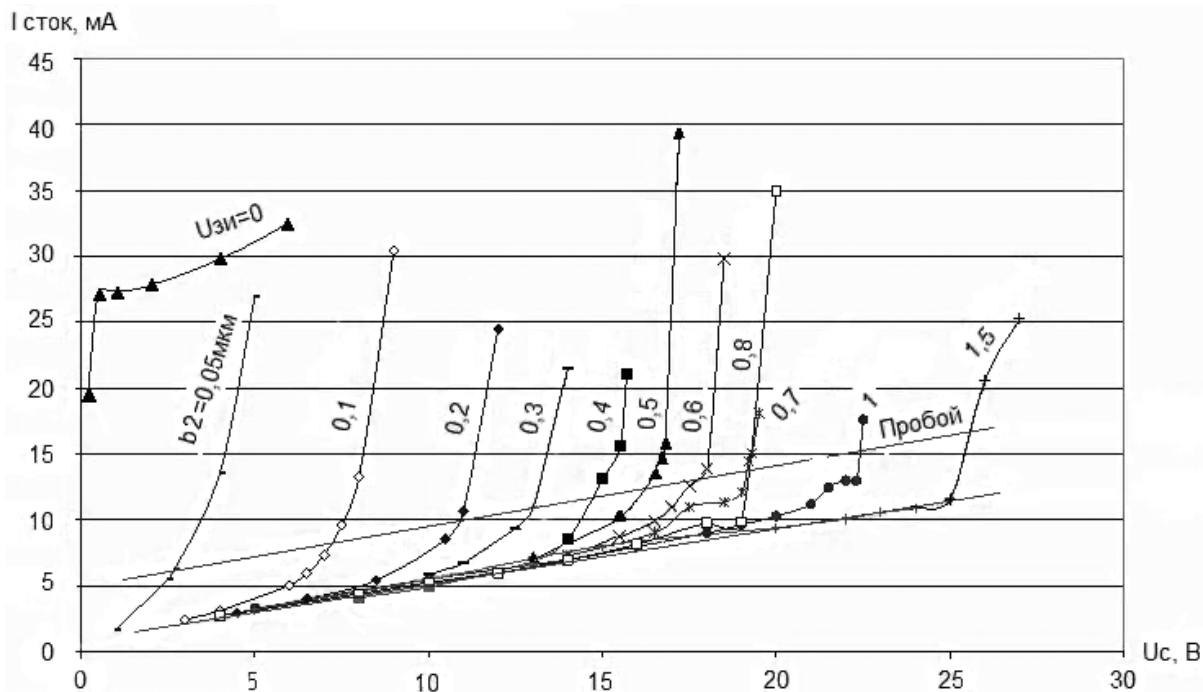


Рис. 3.

Зависимость I_c от напряжения на стоке (U_c) для различных структур GaAs ПТШ с одинарным углублением в районе затвора

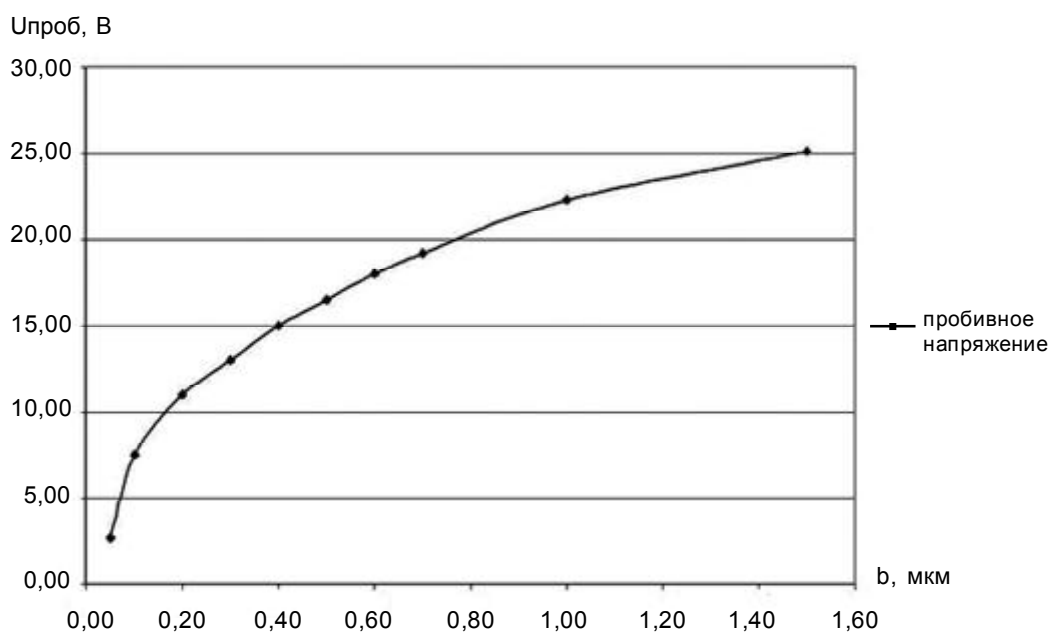


Рис. 4.

Зависимость пробивного напряжения от параметра b_2

Разобраться в причине падения пробивного напряжения позволяет дальнейший анализ полученных результатов. Анализ показывает, что механизм пробоя изменяется с увеличением b_2 (рис. 5). При малых значениях b_2 (когда пробивное напряжение низкое) основную роль играет пробой затвора, а при больших значениях данного параметра (пробивное напряжение высокое) пробой идет через буферный слой, что подтверждается распределением дырок, приведённым на рис. 6а и 6б. При малых значениях b_2 генерируемые в результате лавинного умножения дырки концентрируются вблизи стоковой границы затвора (желто-зеленая область на рис. 6а). При больших b_2 значительное количество дырок сосредоточено в буферном слое структуры транзистора около истока. Поэтому основная часть избыточного тока протекает между стоком и истоком, минуя затвор (рис. 5).

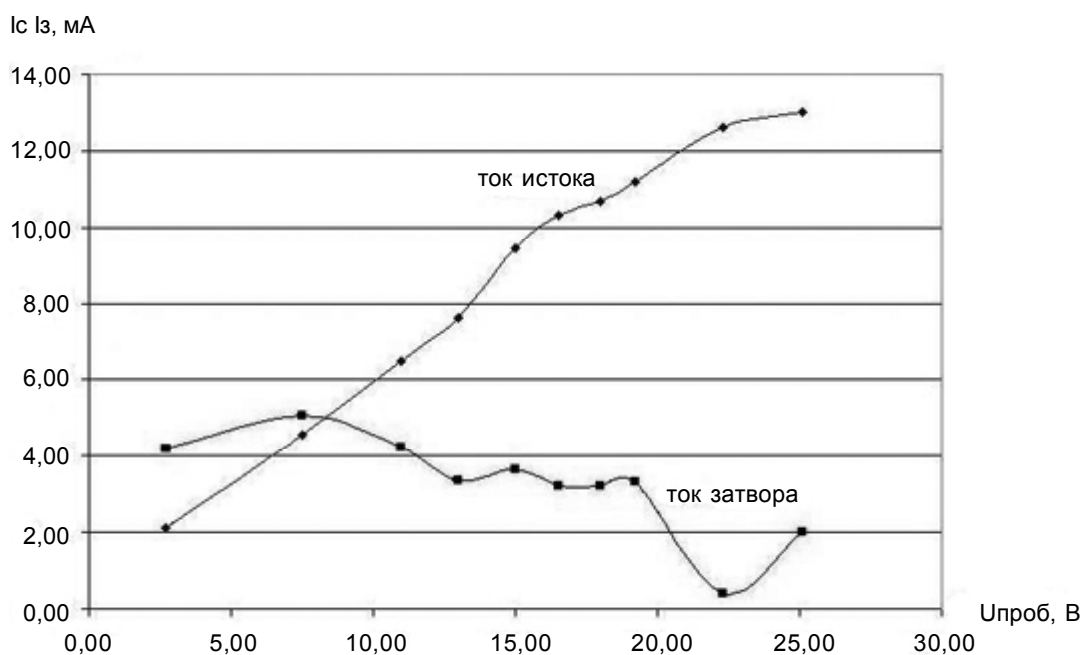


Рис. 5.

Зависимость от пробивного напряжения тока стока (I_c) и тока затвора (I_z) при пробое

Дело в том, что при малых значениях b_2 объёмный заряд обратносмещённого затвора «упирается» в нейтральную пристокую область и избыточный ток пробоя течёт по цепи затвор-сток. Ограничение тока затвора при больших расстояниях b_2 можно объяснить наличием области статического домена с высокой напряжённостью электрического поля, находящейся между стоковым краем затвора и утолщённой пристокую областью. Высокое поле домена (более 5 кВ/см) ограничивает дрейфовую скорость электронов, что и приводит к стабилизации тока. Ток затвора остаётся малым по сравнению с током стока. Превышение пробивного напряжения стока над напряжением начала лавинного умножения вблизи затвора можно объяснить тем, что падение напряжения перераспределяется между призатворным объёмным зарядом и пристокую статическим доменом. При дальнейшем возрастании напряжения стока начинается лавинное умножение в статическом домене, это и приводит к пробояю сток-исток, который можно назвать «вторичным». В [5] показано, что избыточный ток пробоя при этом протекает через буферный слой, что согласуется с данными,

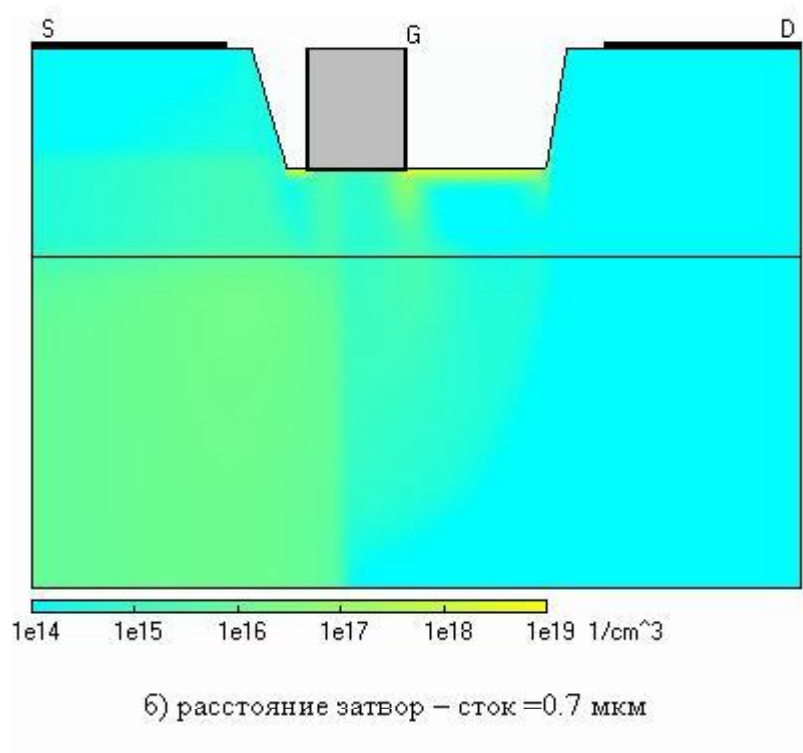
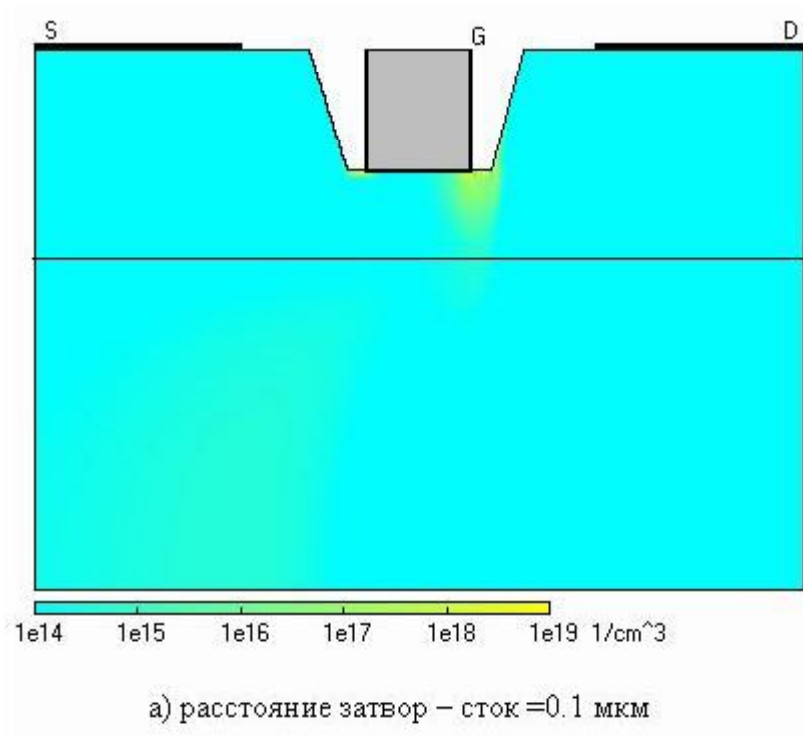


Рис. 6.
Распределение дырок в структуре ПТШ при пробое

приведенными на рис. 5 и 6б. В [5] также показано, что на вольт-амперной характеристике сток-исток может возникать S-образный участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. В данной работе отрицательное сопротивление не наблюдалось, поскольку моделировалась работа прибора, запитанного от идеального источника напряжения с нулевым внутренним сопротивлением.

Было проведено сравнение структур с одинаковым расстоянием затвор-сток, но с разными значениями расстояний исток-затвор (рис. 7).

Результаты показаны на рис. 8. Как видно, изменение расстояния между краем затвора и краем углубления со стороны истока не влияет на пробивное напряжение ПТШ.

Такой результат, казалось бы, является тривиальным, но он подтверждает правильность работы программы моделирования транзистора. Из этого также следует, что в конструкции ПТШ можно смещать затвор к истоку без ущерба для пробивного напряжения. Такое смещение приведет к уменьшению паразитного сопротивления истока в эквивалентной схеме ПТШ и, следовательно, к увеличению рабочей частоты и коэффициента усиления транзистора.

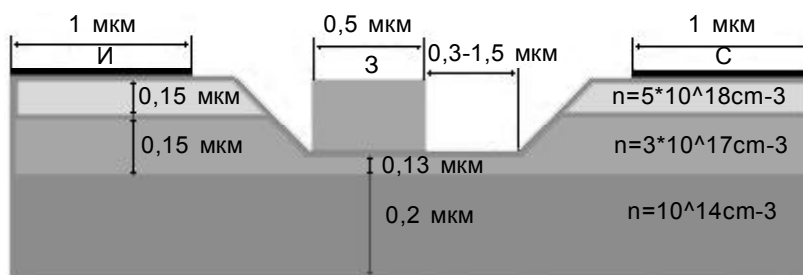


Рис. 7.

Асимметричная структура GaAs с одинарным углублением

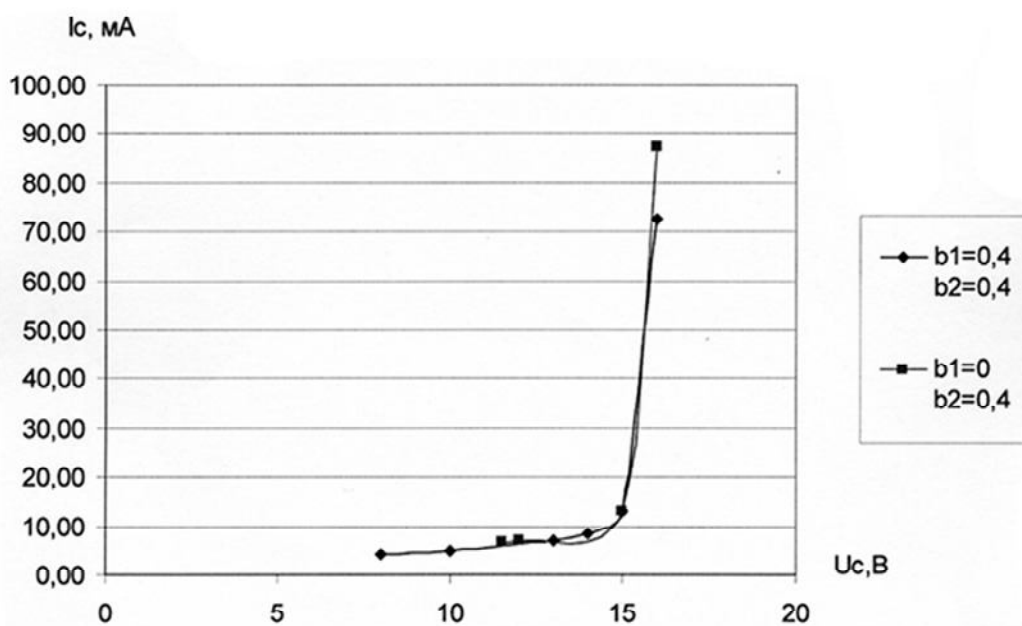


Рис. 8.

Зависимость I_c от U_c для структур с различным значением b_1

2. Моделирование структур ПТШ на основе GaAs с двойным углублением и различными расстояниями b_1 и b_2

Были рассчитаны вольт-амперные характеристики структур ПТШ с различными расстояниями между затвором и стенками углубления при двойном углублении в районе затвора. Проводилось сравнение структур с одинарным углублением (рис. 2) и структур с двойным углублением (рис. 1) при одинаковых совокупных расстояниях от края затвора до края углубления.

Результаты сравнения можно видеть на рис. 9: структура с двойным углублением $b_2 = b_4 = 0,4$ мкм имеет заметно большее пробивное напряжение, чем структура с одинарным углублением $b_2 = 0,4$ мкм, но примерно такое же, как и в случае одинарного углубления с $b_2 = 0,8$ мкм. Тем не менее, применение двойного углубления оправданно, так как из-за технических сложностей затвор очень часто располагается посередине между стоком и истоком (симметричная структура рис. 1), и использование двойного углубления позволяет существенно снизить паразитное сопротивление истока.

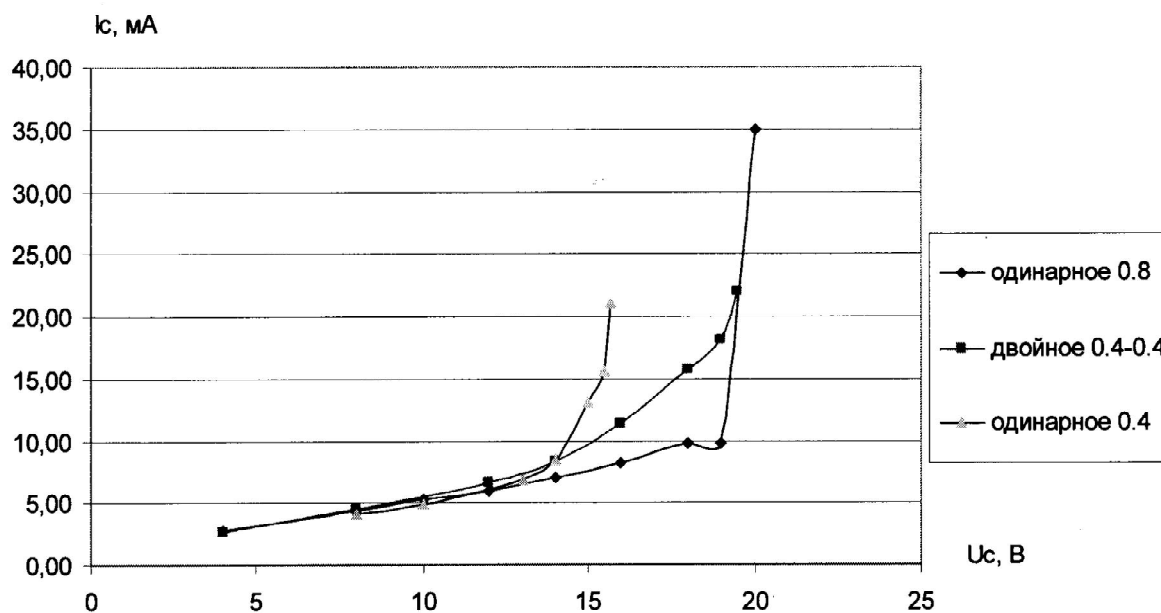


Рис. 9.

Зависимость I_c от U_c для структур с одинарным углублением при $b_2 = 0,4$ и $0,8$ мкм и двойным углублением при $b_2 = b_4 = 0,4$ мкм

Заключение

С помощью моделирования на ЭВМ работы полевых транзисторов с барьером Шоттки на арсениде галлия найдена связь пробивного напряжения сток-исток с взаимным расположением затвора и стенок углубления под канал транзистора. Рассматривался пробой стока при большом напряжении стока и малом токе, что соответствует рабочей точке с максимальным напряжением стока, в которую заходит транзистор в каждом цикле СВЧ колебаний при работе транзистора в классе «А». Показано, что для реализации приемлемых пробивных напряжений расстояние между затвором и ближайшей боковой стенкой углубления под канал со стороны стока

должно быть порядка 0,4 мкм или более. Показано также, что, оптимизируя геометрические параметры поперечного сечения структуры транзистора, можно существенно повысить его пробивное напряжение, уменьшая при этом паразитное сопротивление истока.

Механизм пробоя изменяется с увеличением расстояния затвор-пристоковая стенка углубления: при малых расстояниях пробой происходит через затвор, а при больших практически весь избыточный ток при пробое протекает в пространстве сток-исток, минуя затвор.

В дальнейшем изучение связи параметров поперечного сечения транзистора с его пробивным напряжением будет продолжено для ПТШ на сложных гетероструктурах.

Литература

1. Евдокимова Н. Л., Зубков А. М., Шапиро В. И. Полевой транзистор. - Авторское свидетельство на изобретение № 814193 с приоритетом от 03.04.1978 г.
2. Macksey H. M. et al. Optimization of GaAs power MESFET device and material parameters for 15-GHz operation. - *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-27, Feb. 1980, p.467-471.
3. Гарбер Г. З. Программа моделирования СВЧ полевых транзисторов с барьером Шоттки на основе эпитаксиальных структур AlGaAs/InGaAs/GaAs с произвольным профилем легирования, учитывающая пробой канала и пространства затвор-сток (DIHMESFET). - Авторское свидетельство № 2007612898 с приоритетом от 10.05.2007 г.
4. Гарбер Г. З. Численное моделирование электронно-дырочной плазмы в гетероструктурных полевых транзисторах. - *Радиотехника и электроника*, том 50, № 10, 2005, с. 1908-1912.
5. Vashchenko V. A., Kozlov N. A., Martinov Y. B., Sinkevitch V. F., Tager A.S. Negative Differential Conductivity and Isothermal Drain Breakdown of the GaAs MESFET. - *IEEE Transaction on Electron Devices*, vol. 43, N 4, April 1996.