«Разработка методики моделирования субмикронных МДП-транзисторов в системе TCAD»

диссертация на соискание степени магистра техники и технологии по направлению 210200 «Проектирование и технология электронных средств»

Магистрант: Глушко А.А.

Научный руководитель: Макарчук В.В., МГТУ им. Н.Э. Баумана

Научн. консультант: Амирханов А.В., НИИСИ РАН

Цели работы

- Разработка методики моделирования субмикронных КНИ МДП-структур в САПР TCAD, позволяющей снизить временные затраты на расчет электрических характеристик указанных структур и обеспечивающей устойчивую сходимость численных методов, заложенных в САПР TCAD;
- Исследование влияния температуры на электрические характеристики МДП-структур с субмикронными размерами;
- Исследование воздействия радиационного облучения на электрические характеристики МДП-структур с субмикронными размерами.

Решаемые задачи

- Калибровка модели процесса термического окисления в САПР TCAD на основе экспериментальных данных;
- Калибровка модели технологического процесса ионной имплантации на основе экспериментальных данных, полученных методом вторичной ионной масс-спектроскопии;
- Моделирование системе TCAD технологических параметров КНИ МДП-транзисторов, выполненных по 0,35 мкм технологии: Расчет толщины подзатворного окисла, глубины p-n-переходов, длины канала.
- Расчет электрических характеристик МДП-транзисторов с характерными размерами 0,35 мкм при нормальных условиях. Оценка расхождения между расчетными и экспериментальными данными.
- Расчет электрических характеристик МДП-транзисторов с шириной затвора 0,35 мкм при воздействии температуры.
- Расчет пороговых характеристик n-канального МДП-транзистора с шириной затвора 0,35 мкм при воздействии радиации.
- Определение величины связанного заряда в скрытом окисле КНИ-структуры (технология КНИ, ширина затвора – 0,35 мкм).
- Исследование поведения транзисторов в различных режимах работы при радиационном воздействии
- Анализ численных методов моделирования МДП-транзисторов в САПР TCAD.

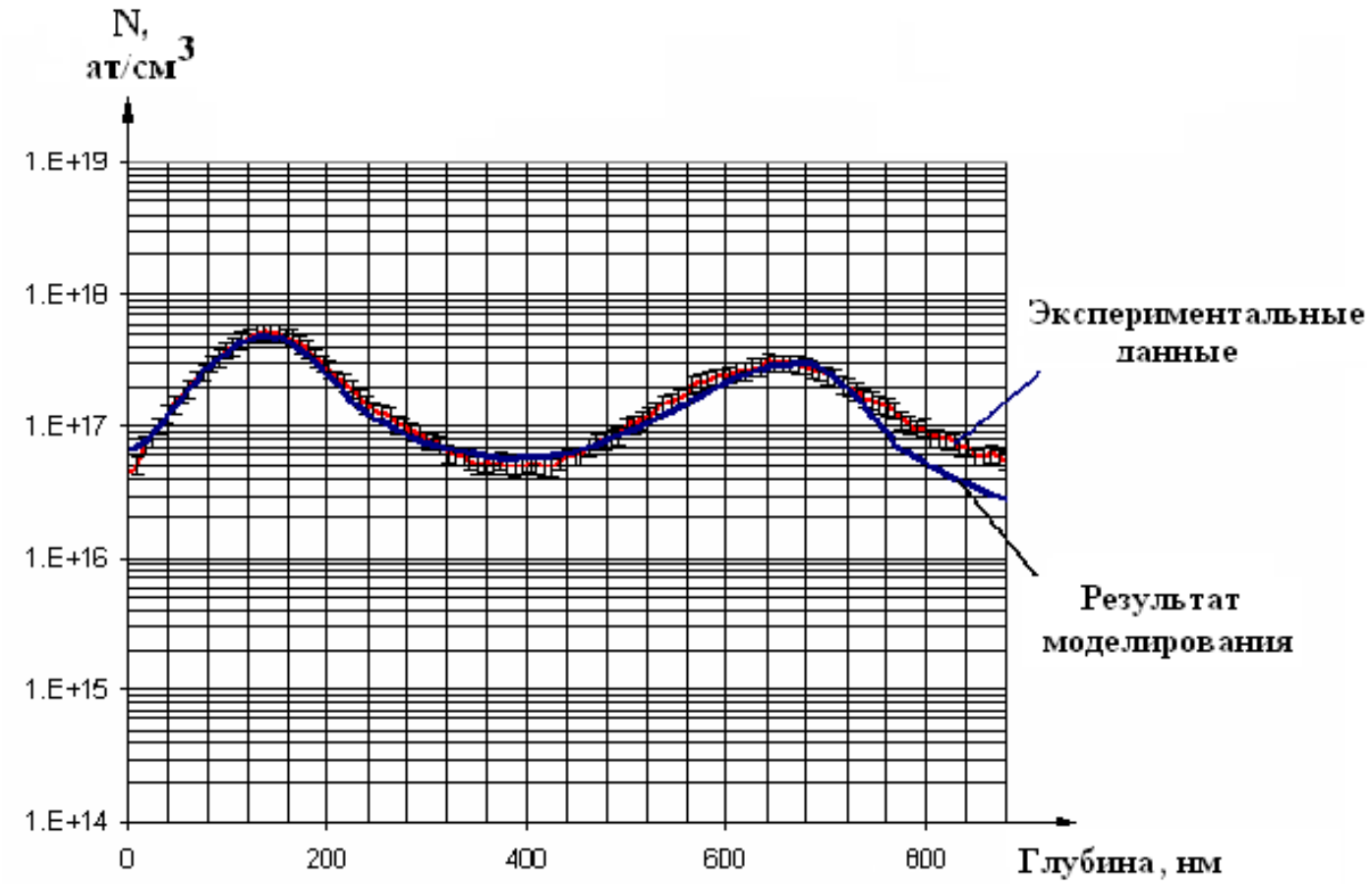
Порядок калибровки моделей технологических процессов

- Анализ моделей технологических процессов, заложенных в САПР TCAD;
- Выбор модели, дающей минимальное расхождение с экспериментальными данными на всем интервале варьирования входных параметров;
- Изменение калибровочных параметров модели с целью приближения результатов моделирования к центру интервала разброса экспериментальных данных

Результаты калибровки модели процесса термического окисления

Технологический режим окисления pO_2 = 760 мм рт. ст.	Расчетная толщина окисла	Измеренная толщина	Границы варьирования величины
T=1000 ºC, t=40 c	39 A	40±5 A	От 35 до 45 A
T=1100 ºC, t=100 c	148 A	140±20 A	От 120 до 160 A
T=1000 ºC, t=110 c	71 A	70±20 A	От 50 до 90 A
T=1100 ºC, t=60 c	112 A	115±10 A	От 105 до 125 A

Результаты калибровки процесса ионной имплантации бора

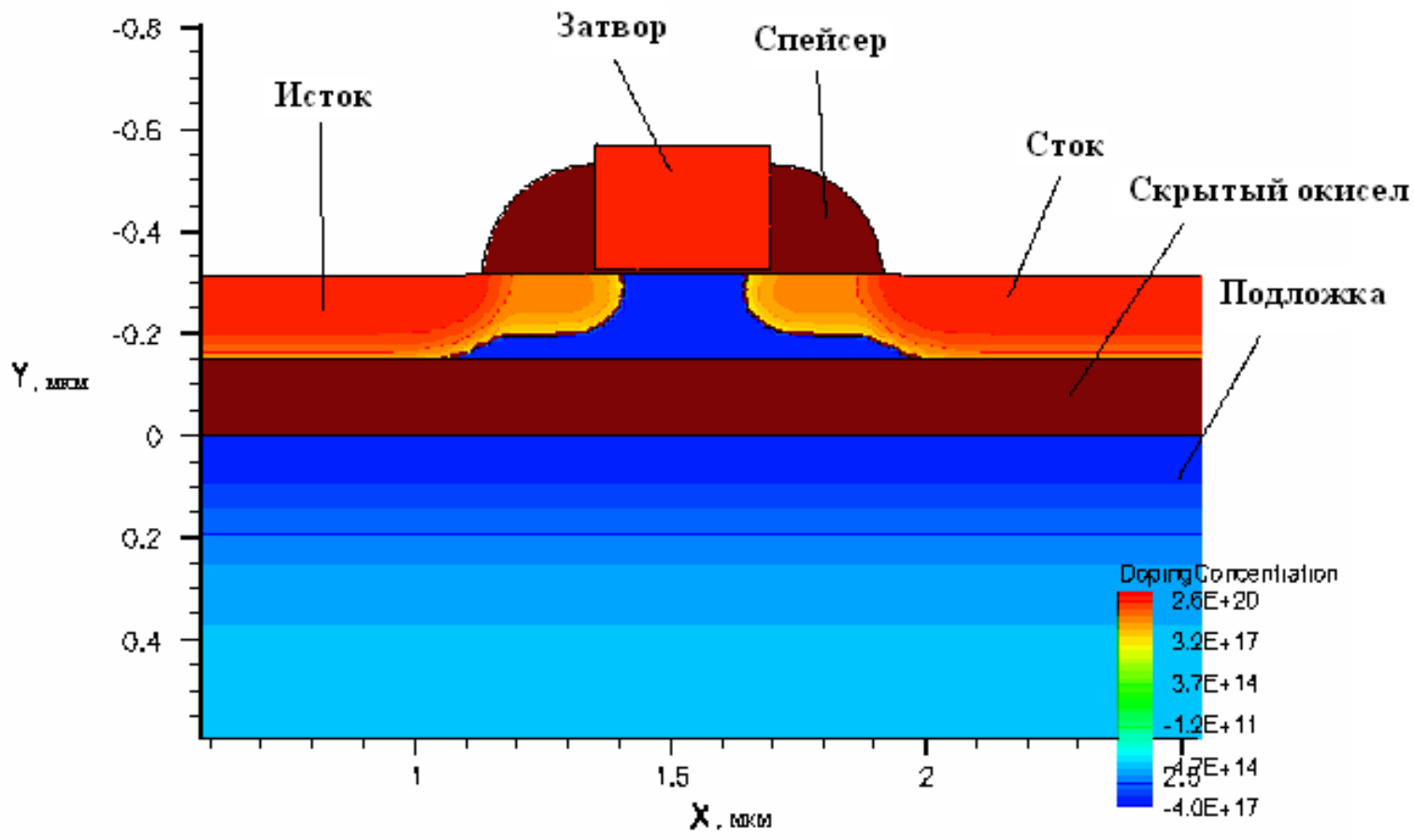


(Две ступени:E = 240 кЭв, D=6x10^{12} см$^{-2}$, E= 40 кЭв, D=5x10^{12} см$^{-2}$)

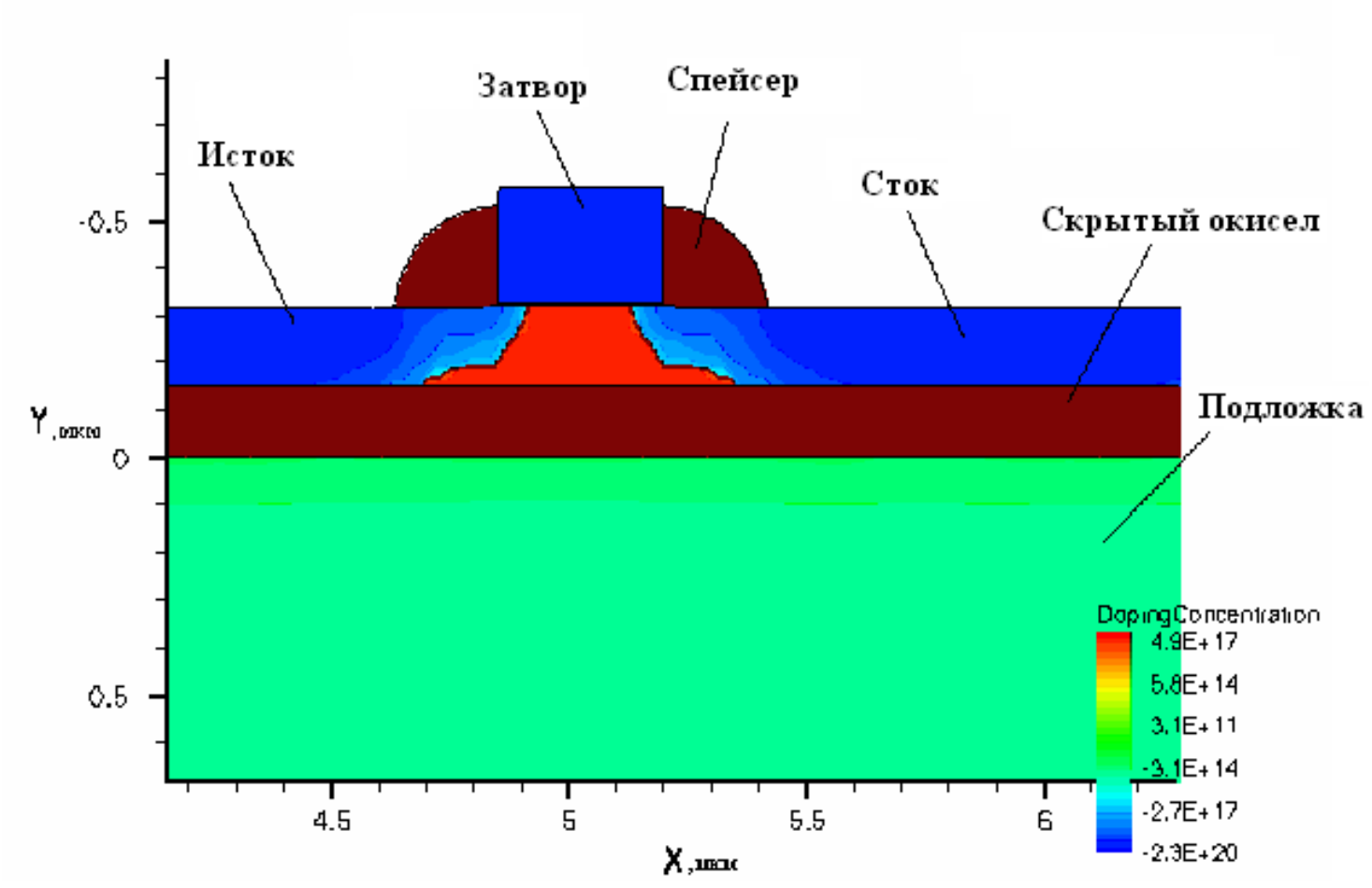
Результаты калибровки процесса ионной имплантации фосфора

(E=360 кЭв, D=6x10^{12} см$^{-2}$, E=60 кЭв, D=2x10^{12} см$^{-2}$)

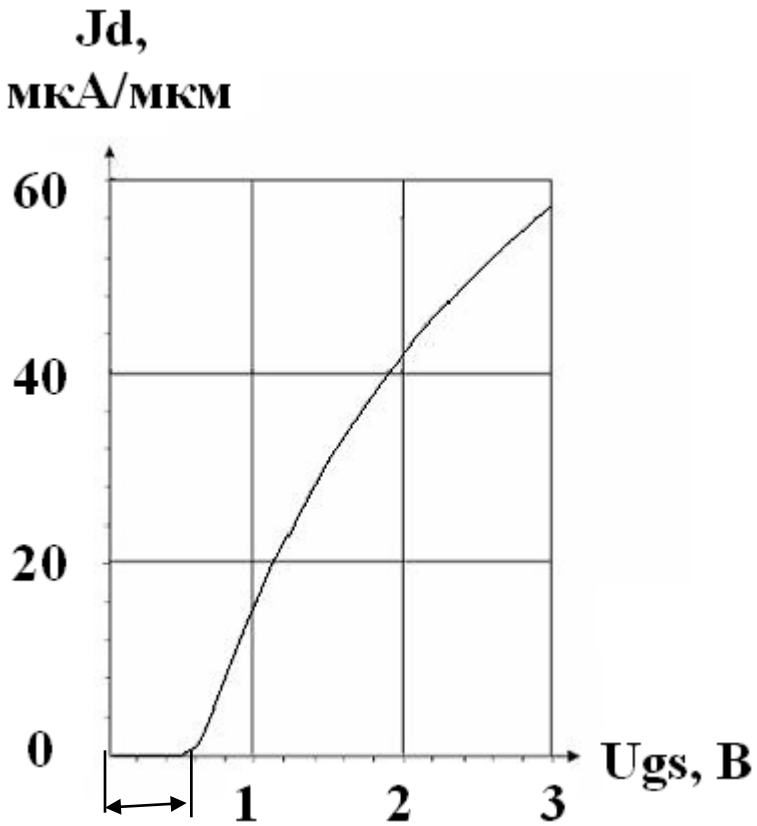
Структура n-канального КНИ МДП-транзистора с шириной затвора 0,35 мкм



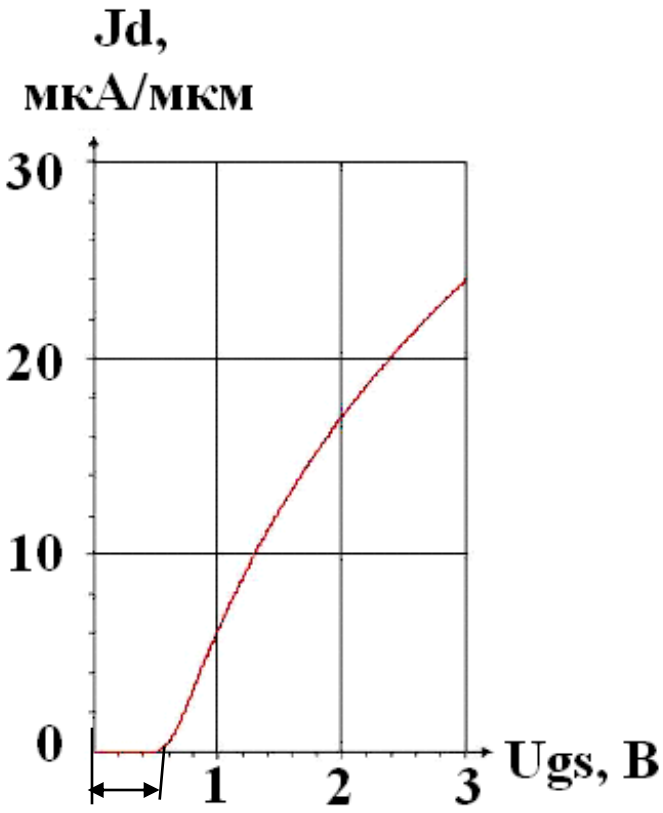
Структура p-канального КНИ МДП-транзистора с шириной затвора 0,35 мкм



Расчётные пороговые характеристики для 0,35 мкм КНИ МДП-транзисторов



Vпор. расч.



Vпор. расч.

<u>n-канальный транзистор</u>

Vпор. расч. = *0,62* В

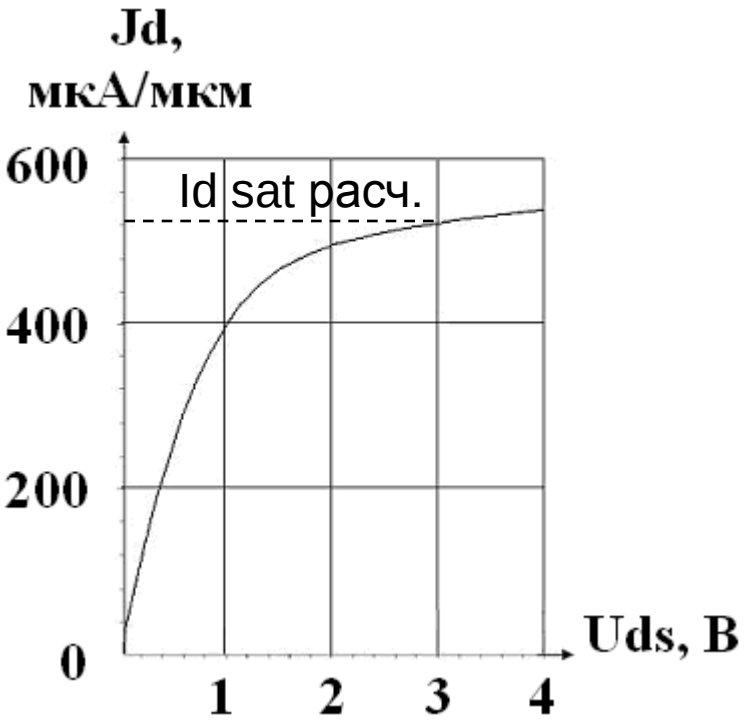
Vпор. эксп. : от *0,59* до *0,63* В

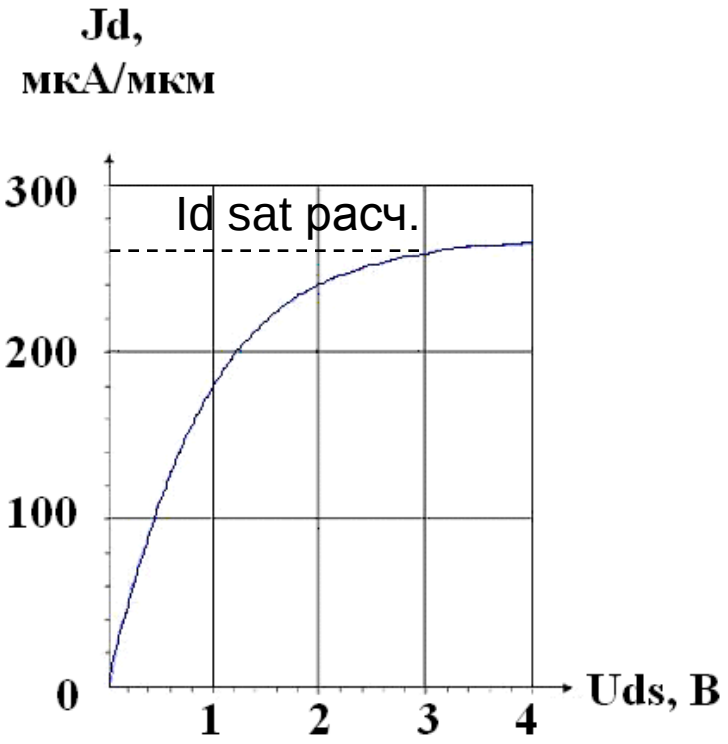
<u>p-канальный транзистор</u>

Vпор. расч. = *- 0,598* В

Vпор. эксп. : от *-0,58* до *-0,6* В

Выходная характеристика p-канального транзистора с шириной затвора 0,35 мкм

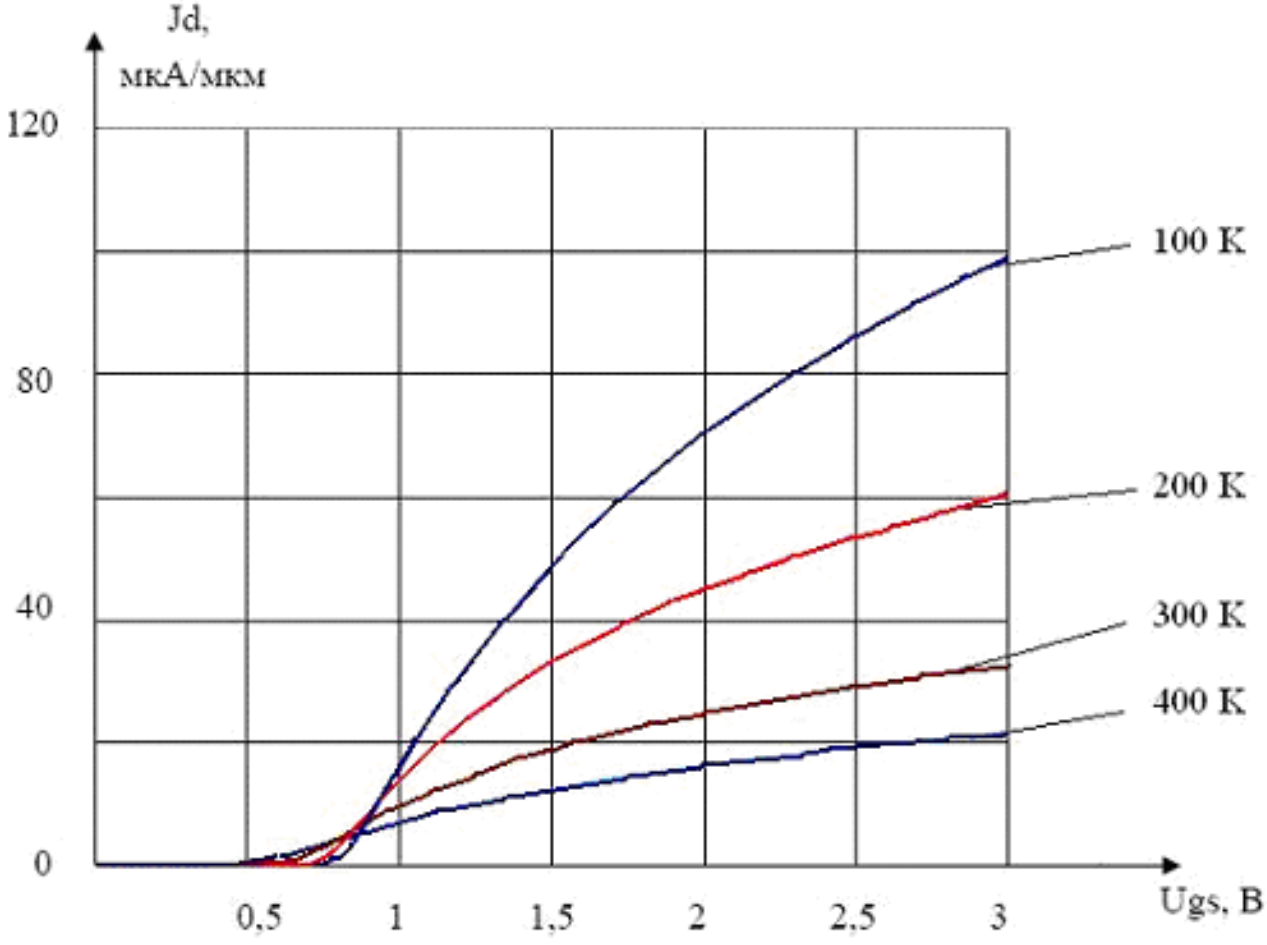




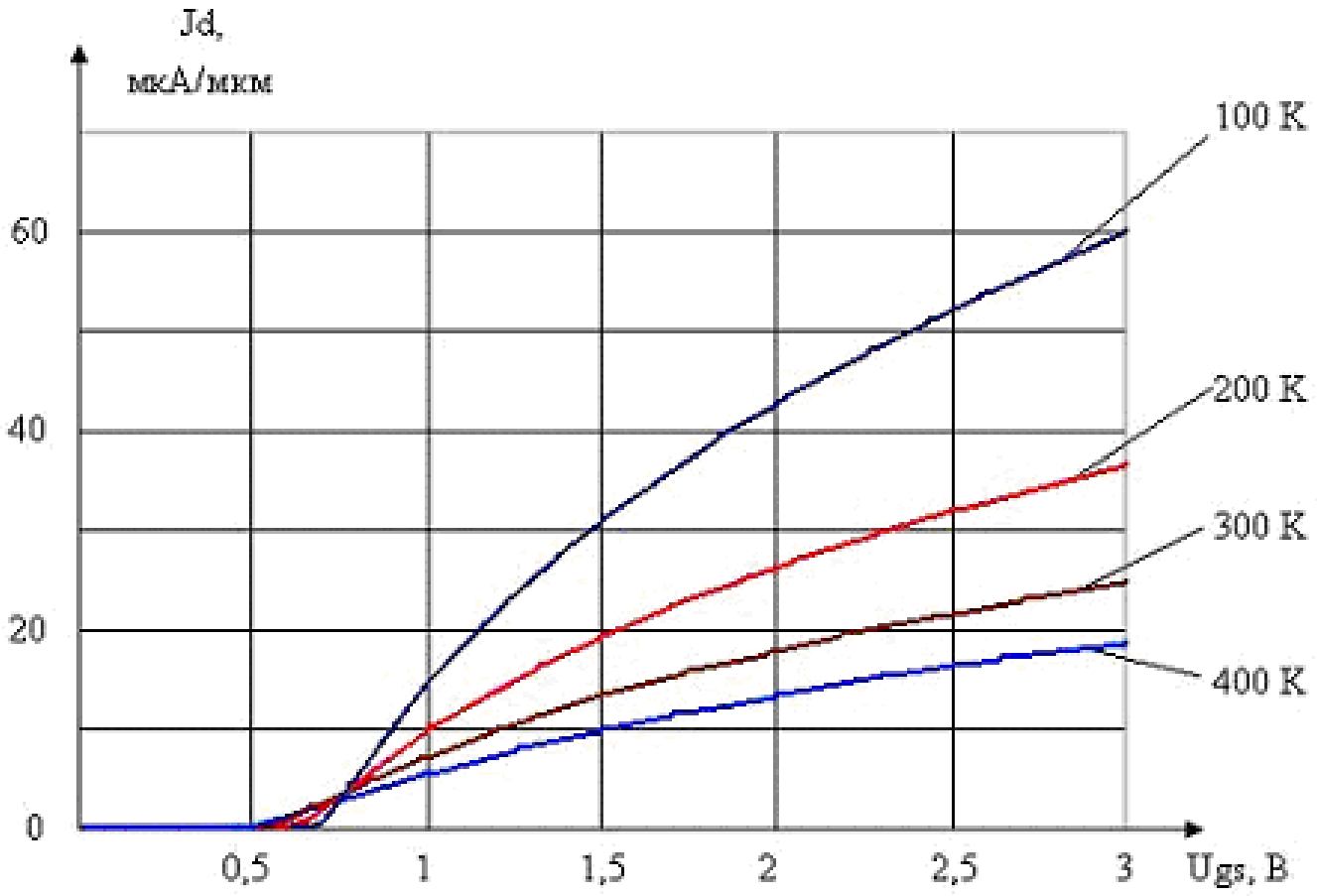
<u>n-канальный транзистор</u>
Id sat расч. = *526* мкА/мкм
Id sat эксп. : от *511* до *541* мкА/мкм

<u>p-канальный транзистор</u>
Id sat расч. = *-260* мкА/мкм
Id sat эксп. : от *- 230* до *-270* мкА/мкм

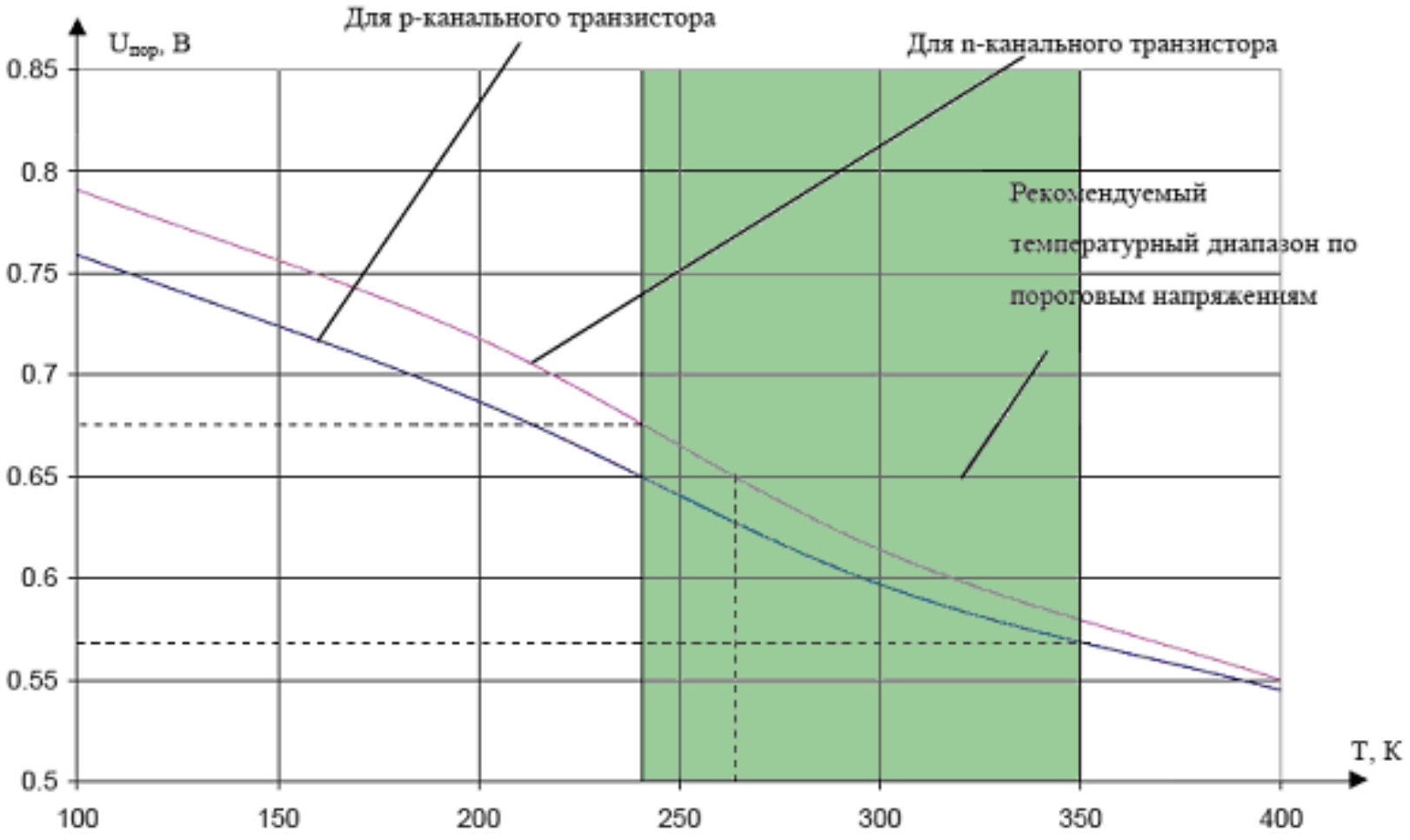
Семейство рассчитанных пороговых характеристик n-канального КНИ МДП-транзистора с шириной затвора 0,35 мкм при различных температурах



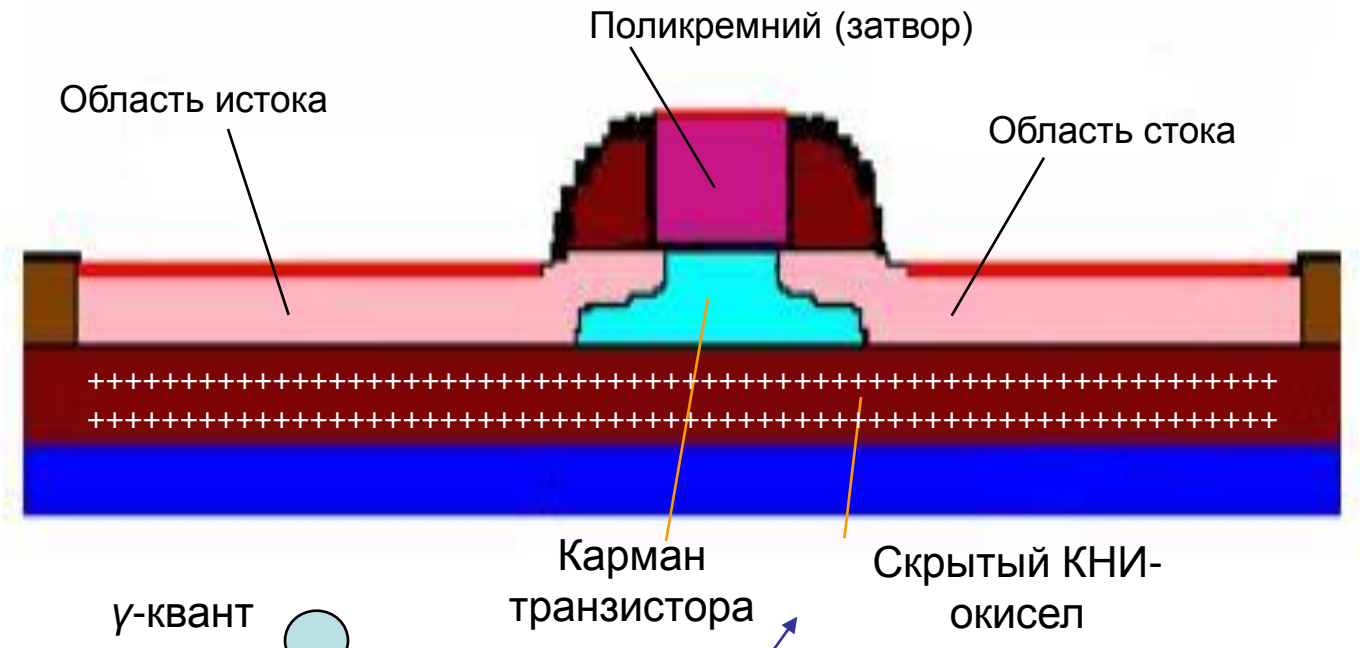
Семейство рассчитанных пороговых характеристик р-канального КНИ МДП-транзистора с шириной затвора 0,35 мкм при различных температурах

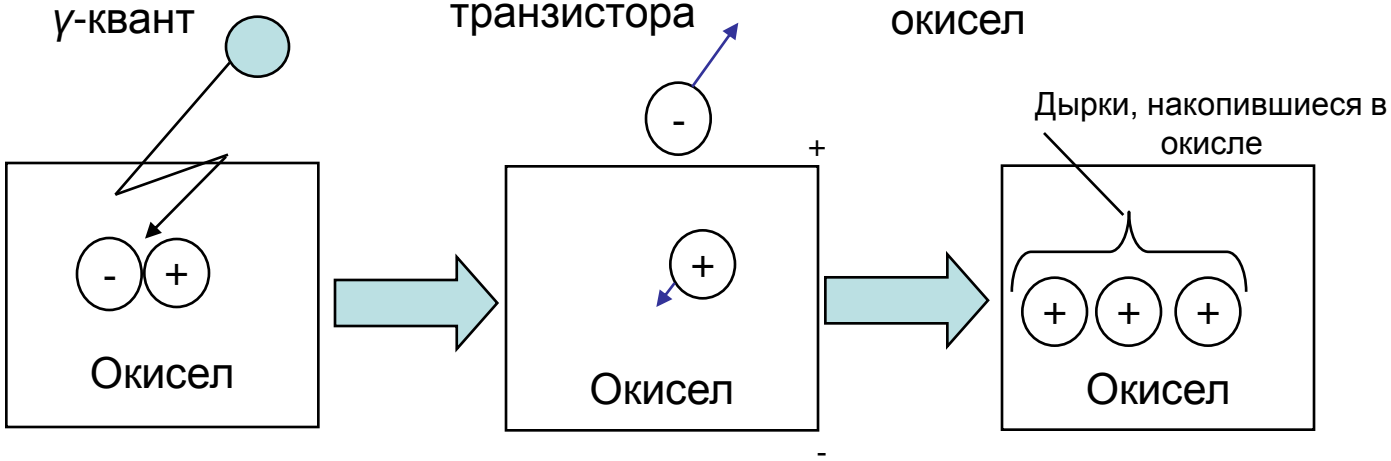


Определение рекомендуемого температурного диапазона работы по результатам моделирования

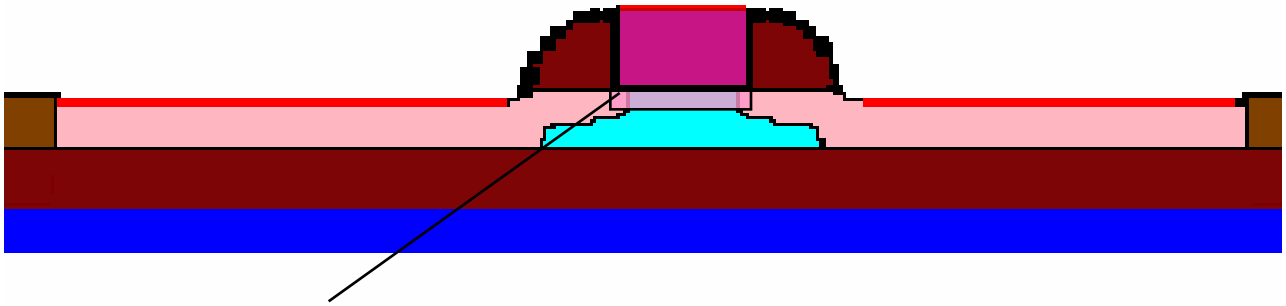


Исследование радиационной стойкости. Механизм деградации диэлектрика



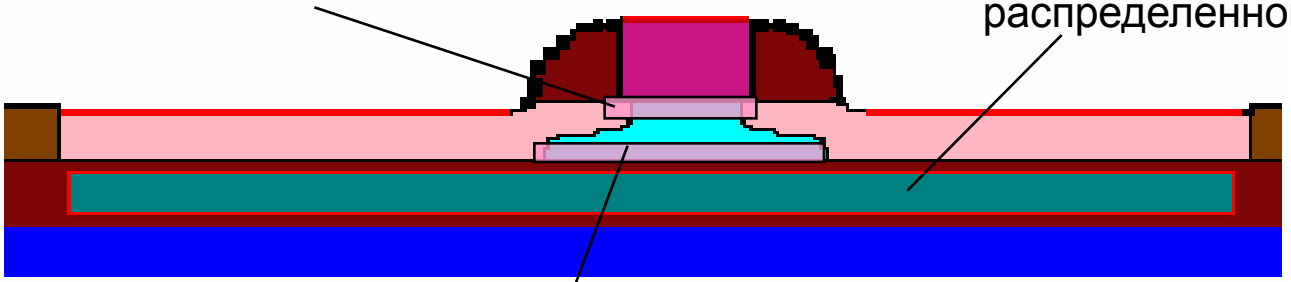


Влияние накопленного заряда на характеристики КНИ МДП-структуры



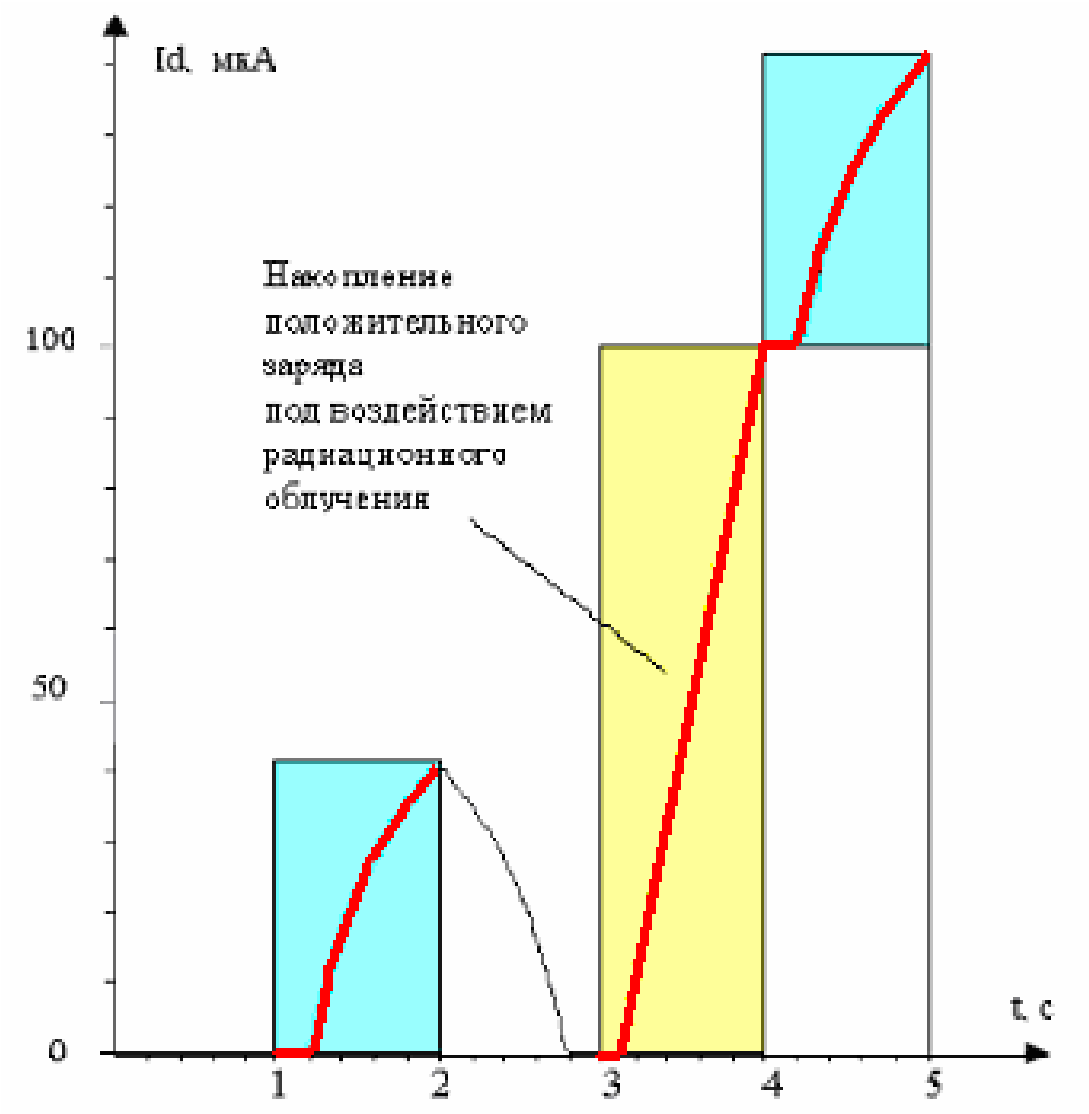
Основной канал

Область равномерно распределенного связанного заряда



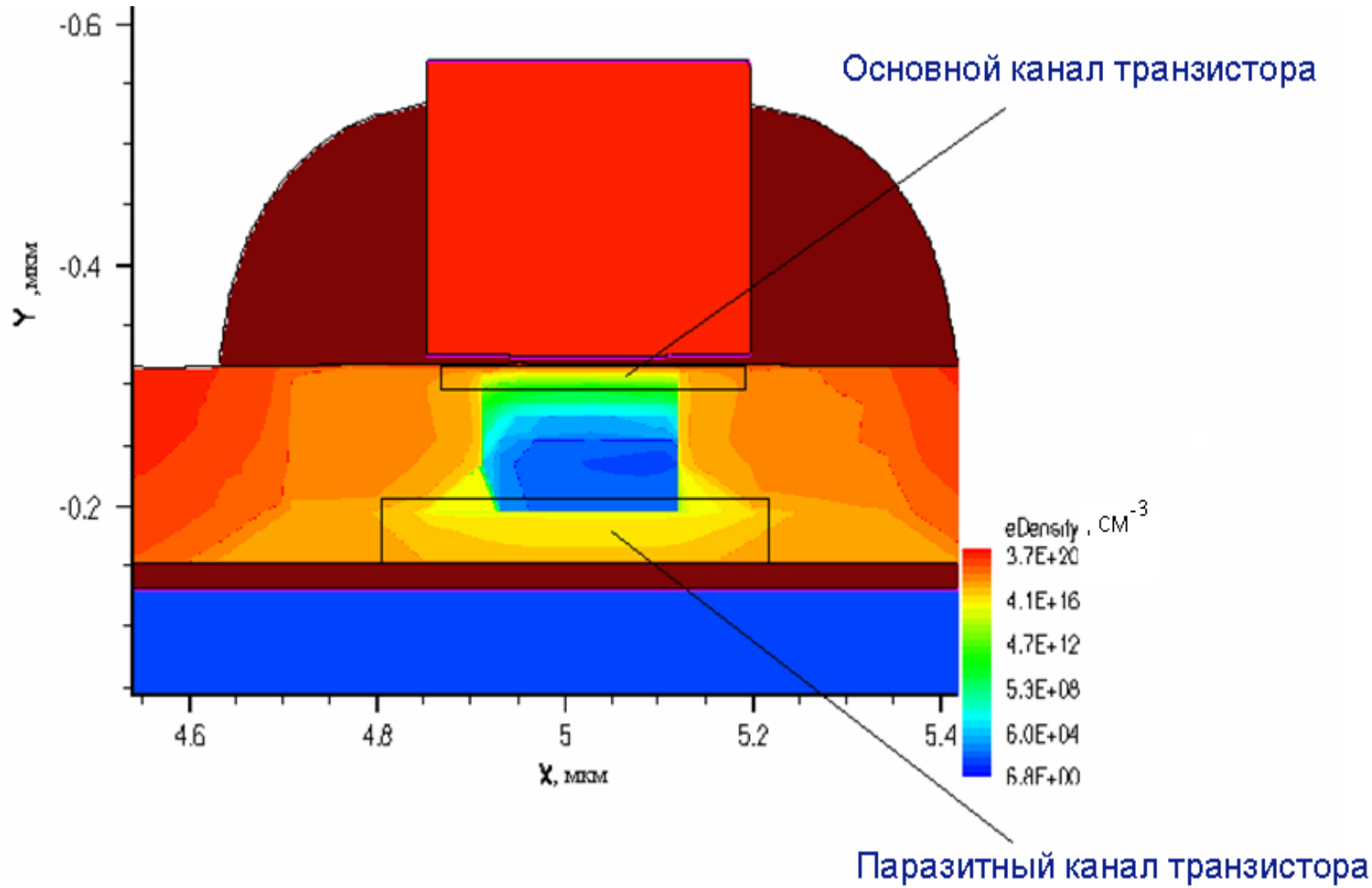
Паразитный канал

Моделирование процесса накопления заряда в скрытом окисле



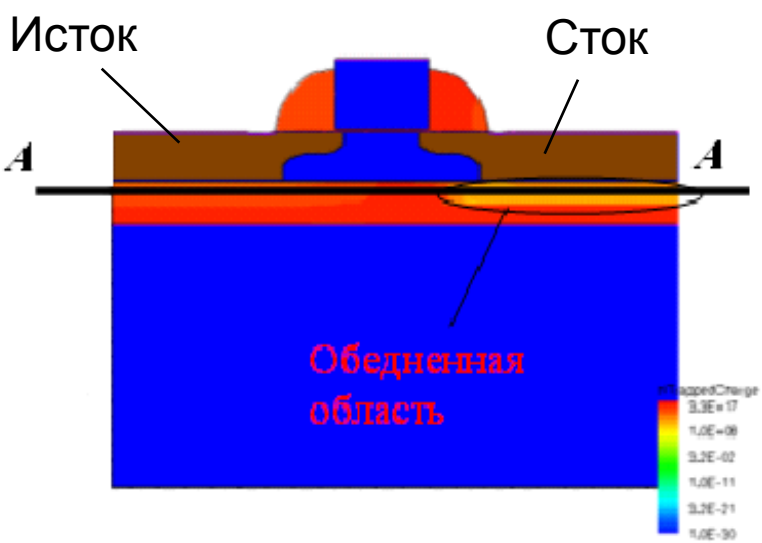
Связанный положительный заряд менялся от 0 до 10^{-13} Кл на интервале времени от 3 до 4 секунд

Основной и паразитный каналы в n-канальном КНИ МДП-транзисторе

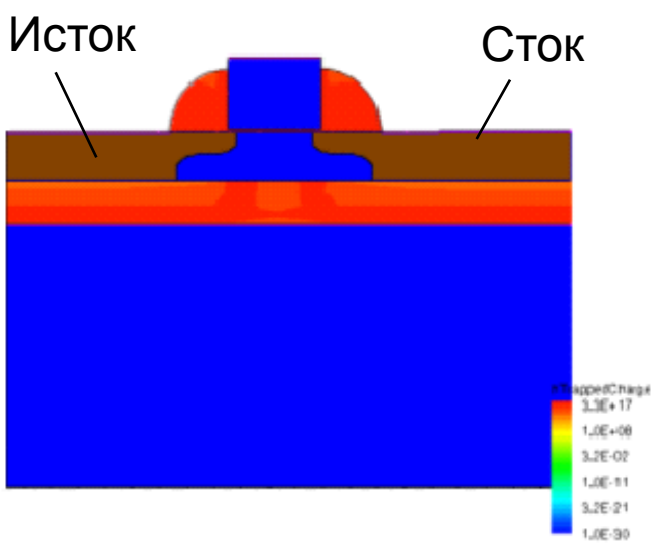


Результаты моделирования распределения связанного заряда в скрытом окисле n-канального КНИ МДП-транзистора

Режим облучения:
Ugs=0 В, Uds = 3 В



Режим облучения:
Ugs=3 В, Uds = 0 В



Под действием внешнего электрического поля дырки, генерируемые в результате радиационного облучения, перемещаются в подзатворную область, оказывая сильное влияние на величину порогового напряжения

Анализ причин нарушения сходимости при моделировании в системе TCAD и рекомендации по их устранению

№	Поведение ошибки	Причина	Рекомендации
1	Монотонное возрастание ошибки	Высокая скорость сходимости	Уменьшить скорость сходимости
2	Монотонное убывание ошибки с большой скоростью, но заданная точность не достигается	Малое максимальное количество итераций	Увеличить максимальное количество итераций счета
3	Монотонное убывание ошибки с малой скоростью	Малая скорость сходимости	Увеличить скорость сходимости
4	Немонотонное изменение ошибки	Высокая скорость сходимости	Уменьшить скорость сходимости; увеличить максимальное количество итераций
5	Немонотонное изменение ошибки	Неудачное начальное	Изменить начальное

Преимущества разбиения всего процесса моделирования на подпроцессы

- 1. На границе подпроцесса возможно вмешательство пользователя с целью коррекции параметров процесса сходимости
- 2. Более высокая вероятность попадания начального приближения в область сходимости

Результаты работы

- **1.** Разработана методика моделирования в системе TCAD физических процессов, протекающих в КНИ МДП-транзисторных структурах, позволяющая существенно сократить время расчета характеристик сложных транзисторных структур, основанная на разбиении всего процесса моделирования на подпроцессы, в каждом из которых обеспечивается его сходимость и постоянство точности расчетов.
- Применение разработанной методики для расчетов функциональных параметров КНИ-МДП-транзисторов позволило сократить время расчетов не менее чем в 4 раза и одновременно добиться более высокой точности результатов моделирования.
- **2.** В системе TCAD выполнены работы по калибровке модели Массоуда, описывающей процесс термического окисления кремния. После калибровки расхождение между измеренными значениями толщины подзатворного диэлектрика и значениями, полученными в результате моделирования, составило не более 10% во всем диапазоне режимов термического окисления.
- **3.** В системе TCAD выполнены работы по калибровке модели процесса ионной имплантации. Определены параметры распределения Пирсона «с хвостом», позволяющие на глубинах до 0,5 мкм иметь расхождение между теоретическими и экспериментальными данными по концентрационному профилю легирования в пределах точности самих экспериментальных данных.

Результаты работы (продолжение)

- **4.** С помощью системы TCAD рассчитано изменение электрических характеристики КНИ МДП-транзисторов при воздействии температуры и радиационного облучения. Рассчитана динамика процесса формирования и накопления связанного заряда в скрытом окисле при радиационном облучении, раскрывающая механизм образования паразитного канала в *n*-канальной КНИ МДП-транзисторной структуре.
- Уже при небольших значениях накопленного связанного заряда (порядка 10^{-14} Кл) в *n*-канальном КНИ МДП-транзисторе образуется паразитный канал, переводящий его из закрытого состояния в проводящее независимо от напряжения на затворе.
- **5.** На основе рассчитанных с помощью системы TCAD зависимостей электрических характеристик КНИ МДП-транзисторов от температуры для СБИС, содержащих КНИ МДП-транзисторы с шириной затвора 0,35 мкм, определен температурный диапазон (– от минус 30 ºС до +80 ºС), в котором обеспечивается надежная работа СБИС, содержащих указанные полупроводниковые приборы.