электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 621.382

Параметрическая оптимизация электрофизических параметров КНИ МОП-транзистора на основе системы приборно-технологического моделирования

***Юлкин А.С.**, студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»

Научный руководитель: Макарчук В.В., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»
info@iu4.bmstu.ru

Введение

Согласно закону Мура [1], каждые два года происходит удвоение числа транзисторов в интегральной схеме. За полвека технология микроэлектронного производства проделала путь от первых интегральных схем из одного активного элемента до сверхбольших интегральных схем (СБИС), состоящих из сотен миллионов или миллиардов транзисторов. С повышением степени интеграции происходит сокращение минимальной проектной нормы СБИС с десятков микрометров до субмикронных размеров и, как следствие, увеличение числа слоев металлизации и количества технологических операций, требуемых для изготовления такой СБИС. В настоящее время, при проектировании МОП-транзисторов с длиной канала порядка 0,25 мкм, требуется учет дополнительных особенностей (например, неоднородные примесные профили), который оказывается практически невозможен без численного моделирования с помощью ЭВМ [2].

Проектирование технологических операций изготовления СБИС зачастую сопровождается постановкой и решением задач оптимизационного характера: поиск экстремума критических электрофизических параметров элементов СБИС путем варьирования режимов технологических операций, сохранив при этом другие параметры в области допустимых отклонений от первоначальных значений. Рассматривая такие задачи, можно отметить, что они характеризуются большим количеством варьируемых переменных (режимов технологических операций), которые так или иначе сказываются на

электрофизических параметров элементов СБИС, и, в конечном счете, влияют на параметры изготавливаемой СБИС.

На сегодняшний день поиск оптимальных режимов технологических операций также осуществляется методами численного моделирования. Переход от экспериментального получения количественных оценок параметров элементов СБИС к математическому моделированию с использованием возможностей высокопроизводительных ЭВМ привел к радикальному ускорению в области разработки технологии изготовления СБИС с оптимальными режимами. При этом проводится многократное моделирование технологического процесса в целом с изменением режимов отдельных операций с целью определения степени соответствия результирующих параметров моделируемых элементов СБИС целевым значениям.

Однако, при отсутствии методики оптимизации, этот способ моделирования остается все же недостаточно эффективным, так как расчет типового элемента СБИС (например, МОП-транзистора) с приемлемой аппроксимирующей сеткой порядка 10-15 тысяч вершин занимает даже в одной из самых передовых систем приборно-технологического моделирования TCAD Synopsys обычно несколько часов. Большое количество изменяемых параметров технологических операций приводит к необходимости многократного расчета физической структуры конкретного элемента СБИС. В результате время выполнения даже одной итерации процесса оптимизации затягивается практически на несколько дней.

В работе [3] была предложена методика оптимизации, позволяющая найти приемлемый метод оптимизации и определить параметры его настройки. С помощью этой методики была проведена оптимизация одномерной модели КНИ *n*-канального МОП-транзистора по критерию повышения порогового напряжения его паразитного[1] транзистора. Статические параметры двухмерной модели, полученной с рекомендованными параметрами режимов технологических операции представлены в таблицах 1 и 2.

1 При изготовлении СБИС на пластине со структурой кремний-на-изоляторе (КНИ) одновременно с структурой транзистора,называемого основным, получается т. н. паразитный транзистор. Его структура образована общими областями истока и стока, «подзатворным» окислом и затвором, роль которых выполняют, соответственно, «скрытый» окисел и подложка.

Таблица 1

Электрофизические параметры основного транзистора

	До оптимизации	После оптимизации	Отклонение, %
Пороговое напряжение при $U_{ds} = 0{,}1$ В,В	*0,591*	*0,636*	*7,6*
Плотность тока насыщения при $U_{ds} = 0{,}1$ В, А/мкм	*$1{,}03\times10^{-4}$*	*$9{,}94\times10^{-5}$*	*3,5*
Пороговое напряжение при $U_{ds} = 2{,}5$ В,В	*0,855*	*0,894*	*4,6*
Плотность тока насыщения при $U_{ds} = 2{,}5$ В, А/мкм	*$6{,}55\times10^{-4}$*	*$6{,}19\times10^{-4}$*	*-5,5*

Таблица 2

Электрофизические параметры паразитного транзистора

	До оптимизации	После оптимизации	Отклонение, %
Пороговое напряжение при $U_{ds} = 2{,}5$ В,В	*13,9*	*29,0*	*108,6*
Плотность тока насыщения при $U_{ds} = 2{,}5$ В, А/мкм	*$4{,}80\times10^{-11}$*	*$2{,}11\times10^{-11}$*	*-56,0*

Как видно из таблицы 1, отклонения электрофизических параметров двухмерной модели превысило указанные ограничения (максимальное допустимое отклонение составляет ±5% от значений параметров, полученных при моделировании стандартного технологического процесса). Это объясняется тем, что одномерная модель не учитывает боковое распределение примеси и двухмерные эффекты. Таким образом следующим этапом является проверка работы методики на задаче оптимизации двухмерной модели. Необходимо показать, что такая оптимизация осуществима, отклонения параметров ограничения находятся в допустимых пределах и значение целевой функции близко к полученному значению в таблице 2.

1 Подготовка исходных данных

Согласно методике [3] оптимизация проводится в две стадии. На первой стадии происходит варьирование режимов технологической операции ионной имплантации первой ступени (ступень с большей энергией) для изменения электрофизических параметров паразитного транзистора, на второй стадии происходит варьирование режимов операции ионной имплантации второй ступени (с меньшей энергией) для корректирования электрофизических параметров основного транзистора. При чем для увеличения скорости сходимости допуск на отклонение параметров-ограничений на первой стадии выбирается большим, чем указано в задаче оптимизации. По результатам исследования алгоритма Нелдера-Мида, которым предлагается проводить оптимизацию, было выбрано отклонение в 15% [3]. В качестве целевой функции принимается концентрация легирующей примеси в кармане КНИ *n*-канального МОП-транзистора вблизи границы со скрытым окислом. Ограничения накладываются на изменение концентрации легирующей примеси в кармане КНИ *n*-канального МОП-транзистора вблизи подзатворного окисла.

За начальные значения варьируемых параметров были приняты параметры стандартного базового технологического процесса изготовления КНИ КМОП СБИС с минимальной проектной нормой 0,25 мкм, указанные в таблице 3.

Таблица 3

Параметры режимов операции ионной имплантации стандартного базового технологического процесса КНИ КМОП СБИС с минимальной проектной нормой 0,25 мкм

Переменная	Название	Значение
E_1	Энергия первой ступени ионной имплантации	*70 кэВ*
D_1	Доза первой ступени ионной имплантации	$1{,}2\times10^{13}$ *см*$^{-2}$
E_2	Энергия второй ступени ионной имплантации	*15 кэВ*
D_2	Доза второй ступени ионной имплантации	$7{,}0\times10^{12}$ *см*$^{-2}$

После расчета электрофизических характеристик модели КНИ *n*-канального МОП-транзистора, полученного в ходе моделирования стандартного базового технологического процесса в системе «*TCAD Sentaurus*» фирмы «*Synopsys*» получены параметры основного транзистора (см. таблицу 4).

Таблица 4

Параметры основного транзистора, полученного в стандартном базовом технологическом процессе КНИ КМОП СБИС с минимальной проектной нормой 0,25 мкм

Параметр	Название	Значение
U_{th1}	Пороговое напряжение при U_d=0,1 В	*0,595 В*
I_{dsat1}	Плотность тока насыщения при U_d=0,1 В	$1{,}02\times10^{-4}$ *А/мкм*
U_{th2}	Пороговое напряжение при U_d=2,5 В	*0,842 В*
I_{dsat2}	Плотность тока насыщения U_d=2,5 В	$6{,}58\times10^{-4}$ *А/мкм*

На основании полученных результатов моделирования в таблице 4 рассчитаны допустимые абсолютные отклонения электрофизических параметров основного транзистора в ходе оптимизации (см. таблицу 5).

Таблица 5

Определение границ области допустимых решений задачи оптимизации

Параметр	Отклонение	
	-15%	+15%
U_{th1}, В	*0,506*	*0,684*
I_{dsat1}, А/мкм	$8{,}67\times10^{-5}$	$1{,}17\times10^{-4}$
U_{th2}, В	*0,716*	*0,968*
I_{dsat2}, А/мкм	$5{,}59\times10^{-4}$	$7{,}57\times10^{-4}$

Отклонения в ±15% от первоначальных значений переменных задают область допустимых решений алгоритма оптимизации, причем в случае выхода за границу области допустимых решений происходит попытка возврата, то есть переход ко второй стадии алгоритма для коррекции набранных отклонений значений функции ограничений.

2 Решение задачи оптимизации

Ниже рассмотрено решение поставленной задачи оптимизации с помощью разработанной методики. Поскольку время выполнения оптимизации зависит главным образом от количества вызовов процедуры расчета структуры КНИ *n*-канального МОП-транзистора (расчета целевой функции), то для временной оценки каждой стадии представлены число вызовов целевой функции и функции ограничения в программе.

Результаты двумерного моделирования КНИ *n*-канального МОП-транзистора с учетом полученных значений параметров режимов, представлены на рисунке 1. Показаны профили

распределения акцепторной примеси по глубине кармана кремниевой пластины в стандартном технологическом процессе; с использованием значений параметров режимов, полученных после 1-й стадии алгоритма оптимизации; с использованием значений параметров режимов, полученных после 2-й стадии алгоритма оптимизации.

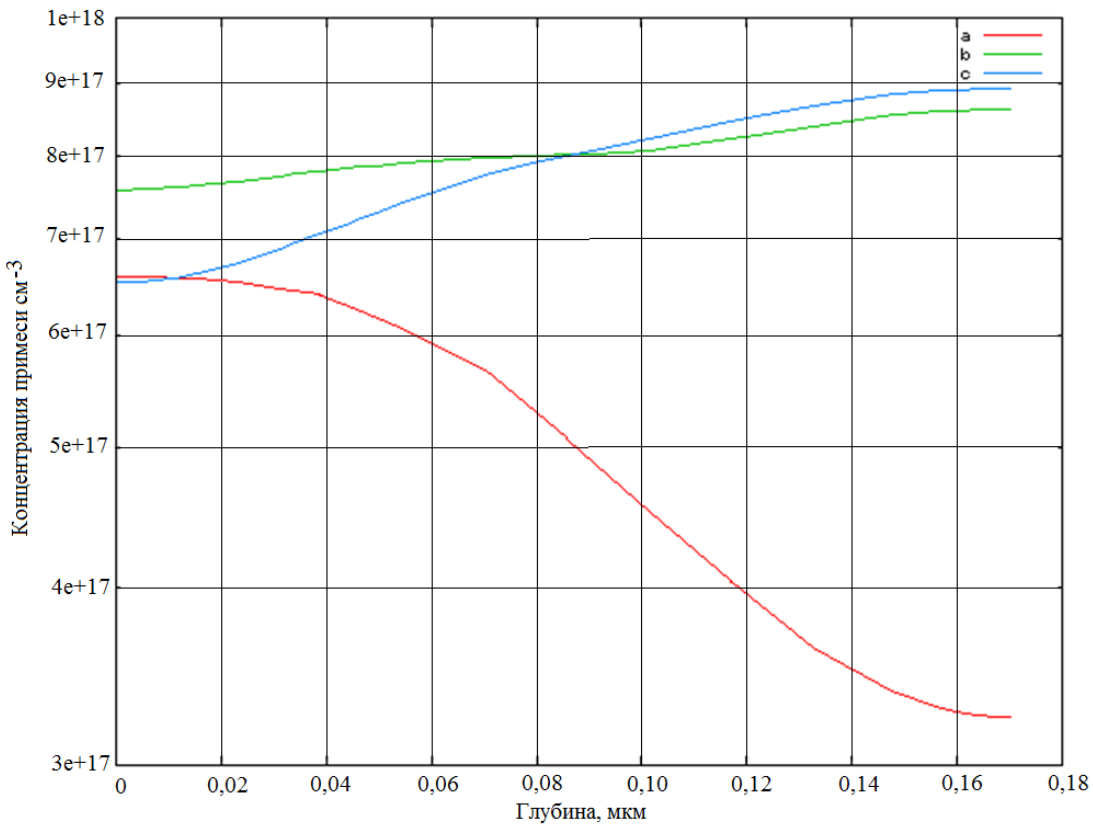


Рис. 1. Концентрационный профиль акцепторной примеси в кармане кремниевой пластины при одномерном моделировании (*a* – профиль при стандартном технологическом процессе, *b* – профиль после выполнения 1-й стадии оптимизации, *c* – профиль после выполнения 2-й стадии оптимизации)

Как видно из рисунка 1, на первой стадии оптимизации произошло резкое увеличение донной концентрации акцепторной примеси, причем концентрация поверхностной примесь также увеличилась, но незначительно. Последующая вторая стадия позволила полностью скомпенсировать отклонение в поверхностной концентрации, и даже немного повысить донную концентрацию вместо ожидаемого ее уменьшения.

В таблице 6 представлены численные значения концентраций акцепторной примеси вблизи поверхности кремниевой пластины, вблизи скрытого окисла, а также отклонения от их первоначальных значений после одномерного моделирования.

Таблица 6

Концентрации акцепторной примеси в кармане КНИ *n*-канального МОП-транзистора, полученного с учетом рекомендуемых параметров режимов операций ионных имплантаций

	До оптимизации	После оптимизации 1-й стадией	После оптимизации 2-й стадией
Поверхностная концентрация примеси, $см^{-3}$	$6{,}59\times10^{17}$	$7{,}58\times10^{17}$	$6{,}53\times10^{17}$
Отклонение поверхностной концентрации примеси, %	-	*15*	*1*
Концентрация примеси вблизи скрытого окисла, $см^{-3}$	$3{,}25\times10^{17}$	$8{,}63\times10^{18}$	$8{,}92\times10^{18}$
Отклонение концентрации примеси вблизи скрытого окисла, %	-	*166*	*175*
Число вызовов целевой функции	-	*240*	*94*

Таким образом, выполненная оптимизация по методике [3] позволила увеличить значение целевой функции, в качестве которой была выбрана концентрация акцепторной примеси в кармане вблизи скрытого окисла, более чем в 2 раза, и при этом обеспечить незначительное (1%) отклонение значения функции ограничений от первоначального ее значения.

Однако прежде чем делать окончательные выводы, необходимо проанализировать непосредственно электрофизические параметры КНИ *n*-канального МОП-транзистора, полученного в ходе технологического процесса с рекомендуемыми параметрами операций ионных имплантаций, которые и являются наиболее важными в задаче оптимизации.

На рисунках 2 и 3 показаны сток-затворные характеристики КНИ *n*-канального МОП-транзистора до и после применения рекомендованных режимов технологических операций при напряжениях на стоке 0,1 В и 2,5 В.

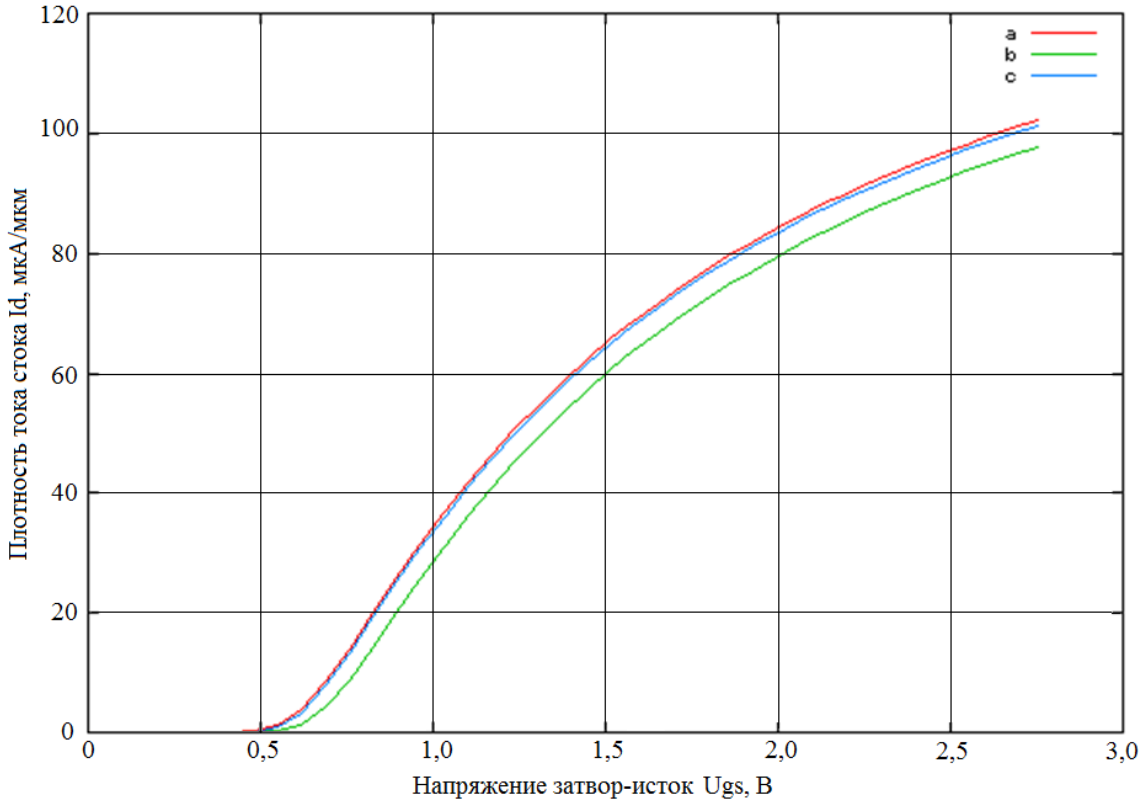


Рис. 2. Сток-затворные характеристики КНИ *n*-канального МОП-транзистора полученного в стандартном техпроцессе (a), полученного с учетом промежуточных режимов ионной имплантации (b) и полученного с учетом рекомендованных режимов ионной имплантации (c), при напряжении на стоке 0,1 В

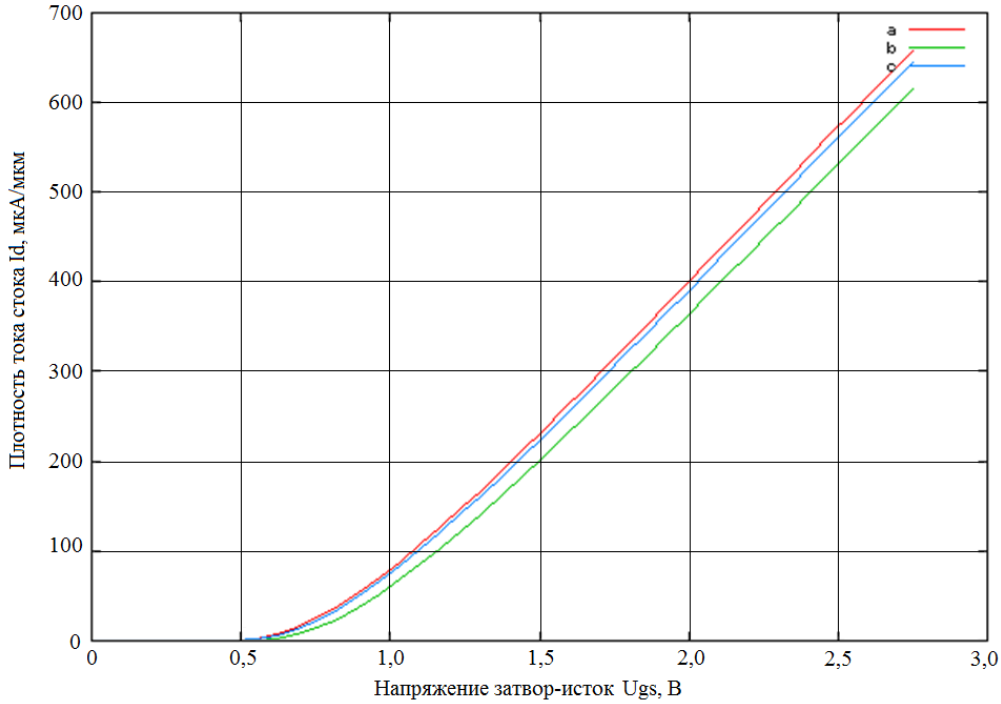


Рис. 3. Сток-затворные характеристики КНИ *n*-канального МОП-транзистора полученного в стандартном техпроцессе (*a*), полученного с учетом промежуточных режимов ионной имплантации (*b*) и полученного с учетом рекомендованных режимов ионной имплантации (*c*), при напряжении на стоке 2,5 В

Из рисунков 2 и 3 видно, что после выполнения первой стадии процесса оптимизации было достигнуто отклонение характеристики от исходной (около 7%), которой затем, во время выполнения второй стадии, было скомпенсировано (приблизительно до 1%). Также можно заметить, что одновременно с увеличением порогового напряжения происходило уменьшение плотности тока насыщения.

В таблице 7 приведены численные значения пороговых напряжений и плотностей токов насыщения «основного» транзистора до и после оптимизации режимов операций ионных имплантаций. Также показаны отклонения этих значений от первоначальных.

Таблица 7

Электрофизические параметры основного транзистора

	До оптимизации	После оптимизации	Отклонение, %
Пороговое напряжение при $U_{ds}= 0{,}1\ B, B$	*0,595*	*0,599*	*0,6*
Плотность тока насыщения при $U_{ds}= 0{,}1\ B, A/мкм$	$1{,}02\times10^{-4}$	$1{,}01\times10^{-4}$	*-0,9*
Пороговое напряжение при $U_{ds}= 2{,}5\ B, B$	*0,842*	*0,855*	*1,6*
Плотность тока насыщения при $U_{ds}= 2{,}5\ B, A/мкм$	$6{,}58\times10^{-4}$	$6{,}45\times10^{-4}$	*-2,0*

В заключение следует рассмотреть сток-затворную характеристику паразитного транзистора, являющуюся основной для данной задачи оптимизации профиля легирования. Такая характеристика изображена на рисунке 4.

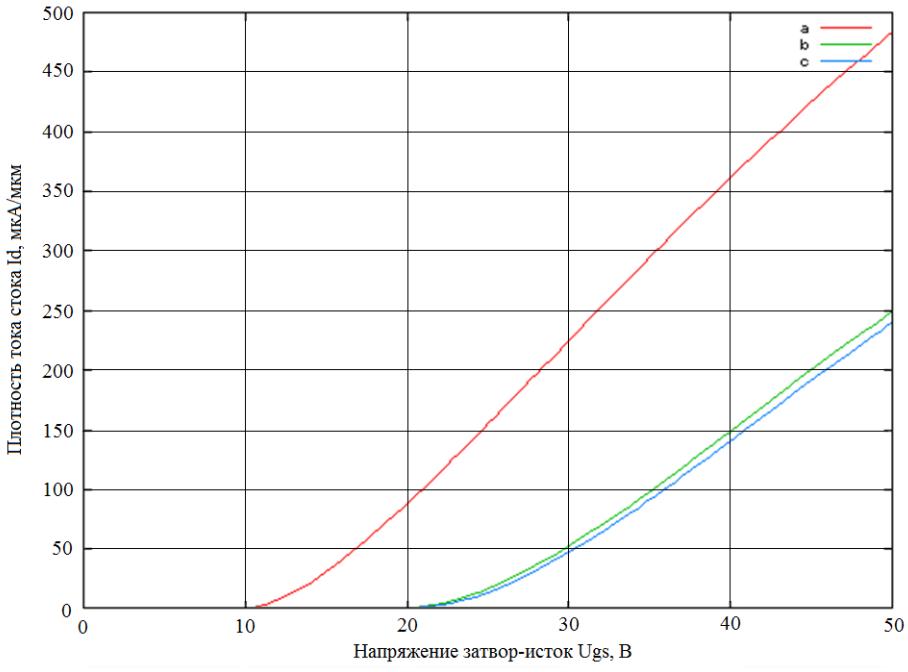


Рис. 4. Сток-затворная характеристика паразитного транзистора (*a* – до оптимизации, *b* – после оптимизации 1-й стадией алгоритма, *c* – после оптимизации 2-й стадией алгоритма)

В таблице 8 приведены численные значения порогового напряжения и плотности тока насыщения паразитного транзистора до и после оптимизации режимов операций ионных имплантаций. Также показаны отклонения этих значений от первоначальных.

Таблица 8

Электрофизические параметры паразитного транзистора

	До оптимизации	После оптимизации	Отклонение, %
Пороговое напряжение при $U_{ds} = 2{,}5\ B, B$	*14,0*	*26,2*	*87*
Плотность тока насыщения при $U_{ds} = 2{,}5\ B, A/мкм$	$4{,}84 \times 10^{-4}$	$2{,}40 \times 10^{-4}$	*-50*

Из таблицы 8 следует, что после оптимизации, как пороговое напряжение, так и плотность тока насыщения паразитного транзистора существенно изменились (на 87% и на -50% соответственно). По сравнению с пороговым напряжением, полученным в работе [4], значение порогового напряжения, достигнутое в настоящей работе, также увеличилось (с 57% до 87%) одновременно с сокращением времени, требуемого на выполнение необходимых расчетов. Для дальнейшего повышения значения целевой функции следует повторно провести оптимизацию с неизменными исходными данными, указанными в таблицах 3-5. Дальнейшая оптимизация будет иметь тенденцию локального увеличения концентрации в окрестности границы кармана рассматриваемого КНИ *n*-канального МОП-транзистора со скрытым окислом. Однако увеличение пиковой концентрации примеси в этой области, возможно, будет способствовать нежелательным ужесточением допусков на процессное окно и поэтому требует дополнительных исследований.

Заключение

Таким образом, выполнены проверка предложенной в [3] методики поиска приемлемого метода оптимизации и параметров его настройки, а также определения допустимого отклонения функций ограничений от ее первоначальных значений для двухстадийного поиска. С использованием этой методики проведена успешная

оптимизация структуры КНИ *n*-канального МОП-транзистора, в результате чего достигнуто увеличение порогового напряжения паразитного транзистора более, чем в 2 раза, с отклонениями пороговых напряжения и плотности токов насыщения при напряжениях на стоке 0,1 В и 2,5 В от первоначальных значений не более 7,6%. В целях снижения отклонений параметров основного транзистора необходимо выполнять оптимизацию на более точной, двухмерной модели.

Список литературы

1. Моделирование элементов и технологических процессов / под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема. М.: Радио и связь, 1988. 496 с., ил.
2. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. М.: Мир, 1989. 630 с., ил.
3. Юлкин А.С. Разработка методики параметрической оптимизации электрофизических параметров КНИ МОП-транзистора на основе системы приборно-технологического моделирования // Сборник трудов 16-й Молодежной международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2014» М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. С. 332-345.
4. Глушко А.А., Юлкин А.С. Особенности оптимизации технологических режимов производства КНИ КМОП СБИС по критерию стойкости к воздействию спецфакторов // Труды НИИСИ РАН. Математическое и компьютерное моделирование сложных технических систем: теоретические и прикладные аспекты. Т.3. №1. М.: Издательство «НИИСИ РАН», 2013. С. 20-23.