

УДК 621.382

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ВЕРИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОП-ТРАНЗИСТОРА С 0,35 МКМ ПРОЕКТНЫМИ НОРМАМИ

ЧАН ТУАН ЧУНГ, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ, С.А. СОРОКА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 17 февраля 2015

Представлено описание оригинального комплексного подхода к решению задачи статистического анализа в процессе сквозного проектирования изделий микроэлектроники от этапа проектирования технологического процесса до проектирования системы. Описано тестирование данной методики на примере исследования влияния разброса технологических параметров на конструктивные и электрические характеристики 0,35 мкм МОП-транзистора, а также на характеристики аналоговых и цифровых схмотехнических решений на его основе.

*Ключевые слова:* интегральная микросхема, 0,35 мкм технология, МОП-транзистор, оптимизация, экстракция, статистический анализ, моделирование, прибор, схема, система.

### Введение

Одной из задач проектирования нового изделия микроэлектроники является оптимизация технологического маршрута изготовления интегральных микросхем (ИМС) с целью обеспечения высокого уровня выхода годных изделий, а также получения наилучших характеристик схемы при выбранных в результате проектирования режимах технологии. Надежность получаемого решения этой «задачи на технологичность» в значительной степени определяется адекватностью результатов моделирования и проектирования экспериментальным данным.

Эффективность использования компьютерных средств при проектировании приборной структуры в значительной степени зависит от полноты учета физических явлений в моделях описания отдельных технологических операций обработки полупроводниковых структур и технологического маршрута в целом. Работоспособность физических моделей определяется «адекватностью» значений параметров уравнений, описывающих моделируемые процессы (коэффициентов диффузии примесей, скорости роста окисла, параметров статистических распределений, описывающих пост-имплантационные профили и проч.). Такие же условия предъявляются и к параметрам уравнений, описывающих транспорт носителей заряда, в процессе моделирования прибора. И, наконец, при моделировании интегральной микросхемы в целом на завершающем этапе последовательности проектирования технологии/прибора/схемы решающим фактором адекватности результатов моделирования экспериментальным данным (например, передаточной характеристики) является соответствующий подбор (экстракция) SPICE-параметров.

Таким образом, в связи с бурным темпом развития технологии и расширением номенклатуры приборов и систем микроэлектроники, проблема оптимизации (настройки) параметров технологического процесса и моделей, используемых в современных программных средствах компьютерного проектирования в микроэлектронике, в настоящее время является как никогда важной и актуальной.

## **Проблемы, возникающие в процессе компьютерного проектирования в микроэлектронике**

Системы автоматизированного проектирования (САПР) широко применяются во многих областях деятельности человека, в том числе и в области микроэлектроники. Использование эффективных инструментов САПР является обязательным на всех этапах проектирования технологии/прибора/схемы/системы (ТПСС) [1]. Важной областью применения программных комплексов в микроэлектронике является решение задачи анализа и оптимизации параметров технологических процессов и математических моделей, описывающих физические процессы, задействованные на каждом этапе проектирования ТПСС.

Известно, что реализация одного и того же технологического маршрута с одинаковыми технологическими параметрами в различных производственных условиях (на разных предприятиях), даже с использованием идентичного оборудования, приводит к разным результатам.

Эффективность использования САПР при проектировании изделий микроэлектроники в значительной степени зависит от точности используемых моделей и определяется не только полнотой физических эффектов, описываемых моделями ТПСС, а также рациональности использования той или иной модели при описании конкретного процесса. В конечном счете, правильная реализация данных задач обеспечивает адекватность результатов моделирования и эксперимента. Если решение второй задачи полностью зависит от разработчика: его знаний и опыта, то решение первой задачи определяется моделями, входящими в состав используемых САПР.

Основу современных САПР микроэлектроники составляют модели, основанные на физическом представлении описываемых ими процессов и явлений. Например, в физических моделях описания технологии формирования элементов (приборов) микроэлектроники (программа *Suprem*) используются коэффициенты, определяющие особенности конкретных процессов, материалов, среды технологической обработки и пр. (коэффициенты линейного и параболического роста окисла при описании операции окисления, коэффициенты диффузии примесей и точечных дефектов в кремнии в моделях перераспределения примесей и множество других коэффициентов); при моделировании переноса носителей заряда (программа *Pisces*) – это, например, коэффициенты, определяющие интенсивности генерации и рекомбинации носителей; при построении ВАХ прибора (программа *SPICE*) – так называемые *SPICE*-параметры.

Достижение необходимой точности результатов проектирования технологии изготовления изделий микроэлектроники в условиях конкретного опытно-промышленного производства определяется не только полнотой физических моделей технологии/прибора, но и выбором адекватных коэффициентов (физических параметров) этих моделей. Использование моделей с физическими параметрами, используемыми разработчиками программного обеспечения по умолчанию, не всегда обеспечивает удовлетворяющее соответствие результатов моделирования экспериментальным данным конкретного опытно-промышленного производства. Использование таких моделей позволяет проводить предварительные исследования по выявлению наиболее значимых параметров технологических операций, влияющих на результирующие характеристики технологии/прибора. Использование программного обеспечения с моделями, адаптированными под условия конкретного производства, позволяет в значительной степени снизить затраты на экспериментальную отработку разрабатываемых изделий, что обеспечивает сокращение временных и финансовых затрат на проектирование и изготовление изделий микроэлектроники, и, в конечном счете, повышение выхода годных изделий.

Статистический анализ в микроэлектронике, в первую очередь, относится к проблеме расчета разброса выходных характеристик ИМС, обусловленных флуктуациями параметров технологических операций. Очевидно, что диапазон разбросов выходных характеристик может оказаться настолько широким, что это приведет к существенному снижению выхода годных. Источниками повреждений схемы могут быть, например, точечные дефекты. Флуктуации параметров технологических операций не всегда приводят к катастрофическому выходу схемы из строя, но они могут привести к существенному ухудшению характеристик схемы и, в

конечном счете, к снижению выхода годных. В последнем случае схема будет функционировать правильно, но ее характеристики, такие как, например, коэффициент усиления или ширина частотной полосы, не будут удовлетворять заданным величинам.

Достижение высокого уровня технологичности производства и выхода годных связано с решением двух задач статистического анализа результатов проектирования, а также компьютерных и натурных экспериментов. Первая, прямая задача, состоит в исследовании влияния статистических флуктуаций технологических параметров на выходные характеристики ТПСС [2]. Целью решения второй, обратной задачи, является определение диапазона допустимых отклонений технологических параметров, обеспечивающих разброс выходных характеристик ТПСС в заданном диапазоне. Для решения указанной статистической задачи наиболее эффективным является метод поверхности откликов (МПО) (в англоязычной терминологии – RSM (Response Surface Methodology)) [3].

Используемые при этом математические методы и программные средства позволяют объединить результаты анализа влияния статистических флуктуаций входных параметров каждого из указанных этапов проектирования на выходные характеристики как проектируемой системы в целом, так и на выходные характеристики составных этапов сквозного процесса проектирования. В конечном счете, задача состоит в установлении связей между статистической информацией на уровне технологического маршрута и выходными характеристиками проектируемой системы.

### **Методика исследований**

Разбросы характеристик ИМС возникают на различных этапах проектирования/производства технологии, прибора, схемы и системы. Статистический анализ проводится с учетом соотношений между соседними уровнями. Например, для анализа статистического разброса (флуктуаций) характеристик прибора, обусловленных изменениями технологических параметров, обычно используется моделирование прибора. Статистическое поведение прибора выражается, например, через набор параметров модели, полученный как результат статистического SPICE-анализа в режиме наихудшего/наилучшего случая. Этот набор параметров используется в дальнейшем при моделировании схемы с целью получения информации о ее поведении в режиме наихудшего/наилучшего случая. Поступая таким же образом, можно получить информацию о поведении системы в режиме наихудшего/наилучшего случая.

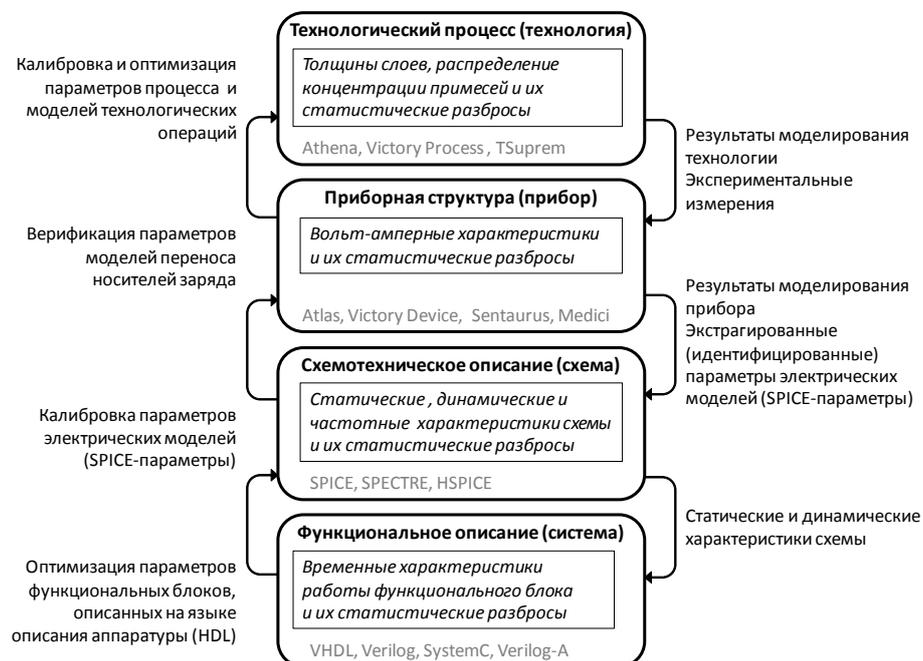
Блок-схема реализации комплексного подхода к решению задачи статистического анализа в процессе сквозного проектирования изделий микроэлектроники от этапа проектирования технологического процесса до проектирования системы представлена на рисунке. Выходные характеристики (результаты аппроксимации) каждого предыдущего этапа являются входными параметрами для последующего этапа проектирования.

Входная информация для этапа проектирования технологии – технологические параметры отдельных операций обработки полупроводниковых структур. Результаты этапа проектирования технологического маршрута формирования приборной структуры – профили распределения примесей, геометрические характеристики прибора, включая глубины залегания *p-n*-переходов, значения поверхностных сопротивлений. В расчетах по моделированию технологических процессов может использоваться программа SSuprem4, входящая в состав модуля Athena программного комплекса компании Silvaco.

Моделирование электрических характеристик прибора осуществляется на основе результатов проектирования технологии посредством использования модуля Atlas программного комплекса компании Silvaco. SPICE-параметры математической модели прибора являются входными параметрами для этапа проектирования прибора, значения которых определяются выходными характеристиками предыдущего этапа проектирования технологии.

Следующий этап процесса сквозного проектирования – моделирование схемы – осуществляется (в случае аналоговой схемы) посредством использования стандартной программы SPICE, которая является ядром всех современных комплексов схемотехнического проектирования, таких как Cadence, Synopsys, MentorGraphics. Влияние флуктуаций входных параметров (SPICE-параметров приборов), диапазон разброса которых определен на

предыдущем этапе проектирования прибора, исследуется в процессе проведения статистического анализа в цикле Монте-Карло (МС-анализ) или статистического анализа по наихудшему случаю (worst-case анализ). В наших расчетах эти виды анализа осуществляются с использованием программного комплекса компании Cadence.



Алгоритм реализации процедуры сквозного статистического проектирования и оптимизации параметров технологии/прибора/схемы/системы

Последний этап процедуры сквозного процесса проектирования – исследование выходных характеристик системы и их разброса, обусловленного флуктуациями характеристик схемы. Задание параметров для моделирования/проектирования системы, в том числе исходных данных для проведения статистического анализа, осуществляется с использованием аппаратного языка описания Verilog-AMS.

Очевидно, что описанный подход последовательно может дать адекватные результаты лишь при условии обеспечения достаточной точности моделирования характеристик проектируемого объекта от элементной базы до системы в целом. В обычном подходе, когда статистический и оптимизационный анализы проводятся отдельно для каждого этапа сквозного проектирования, без строгого учета взаимосвязи этих видов анализа между отдельными этапами проектирования, невозможно не только проанализировать разброс характеристик поведения системы, но и вывести ограничения на разброс параметров технологии из данных по разбросу характеристик прибора/схемы/системы. В предлагаемом подходе, как показано, обсуждаемые задачи решаются посредством комплексного использования как стандартных программных средств проектирования в микроэлектронике, так и собственных – для полиномиальной аппроксимации результатов компьютерных и натуральных экспериментов, с использованием метода поверхности откликов, а также для статистического анализа и оптимизации параметров.

## Результаты

Комплексный подход к решению задачи сквозного статистического проектирования ТПСС протестирован на примере статистического анализа технологического процесса изготовления *n*-МОП-транзистора с 0,35 мкм проектными нормами, электрических характеристик приборной структуры, а также исследования разбросов электрических характеристик типичных цифровой (D-триггер) и аналоговой (дифференциальный усилитель) схем на основе данного прибора. В качестве спецификации и базового описания параметров технологических операций создания МОП-транзистора использовалась документация на установленную в ОАО «Интеграл» технологическую линейку [4].

С целью приведения в соответствие результатов технологического и приборного проектирования результатам экспериментальных измерений реально изготовленных приборов, на первом этапе проведена оптимизация технологического процесса изготовления и электрических характеристик 0,35 мкм *n*-МОП-транзистора.

По результатам компьютерного моделирования (см. табл. 1) технологического процесса изготовления 0,35 мкм *n*-МОП-транзистора с использованием стандартных значений параметров технологического процесса, можно сделать следующие выводы:

- перераспределение примеси в область под затвором не соответствует данным спецификации [4], что требует проведения оптимизации технологических параметров процесса, а также калибровки коэффициентов диффузии фосфора в кремнии;

- необходимо оптимизировать значение порогового напряжения  $V_{th}$  с целью достижения величины 0,6 В.

Таблица 1. Параметры структуры *n*-МОП транзистора

Технологические и электрические характеристики <i>n</i> -МОП транзистора	Требуемое значение	Расчет	$\Delta$ , %
Перераспределение примеси в область под затвором, мкм	< 0,05	< 0,02	250
Глубина <i>p-n</i> -перехода стока/истока ( $X_j$ S/D), мкм	0,18	0,196	8,7
Глубина <i>p-n</i> -перехода областей LDD ( $X_j$ LDD), мкм	0,08	0,066	21,3
Пороговое напряжение $V_t$ , В ( $V_{сток} = 100$ мВ)	0,6	0,56	7,3
Ток насыщения $I_d$ , А/мкм при $V_d = 3$ В; $V_g = 3,3$ В	$5,7 \times 10^{-4}$	$6,5 \times 10^{-4}$	13,9

С использованием собственного подхода, основанного на использовании методов оптимизации, реализованного в программном комплексе Unistat проведена процедура оптимизации параметров технологического процесса с целью получения значений выходных характеристик, соответствующих спецификации, а также результатам экспериментальных измерений. Результаты оптимизации представлены в табл. 2.

Таблица 2. Полученные параметры в результате оптимизации

Цель оптимизации	Стандартное значение	Начальное значение	Конечное значение	Разброс
Область суб-диффузии под затвором, мкм	< 0,05	< 0,02	0,048	0,2
Глубина <i>p-n</i> -перехода стока/истока, мкм	0,18	0,196	0,179	0,63 %
Глубина <i>p-n</i> -перехода областей LDD, мкм	0,08	0,066	0,0761	4,86 %
Пороговое напряжение $V_{th}$ , В ( $V_{сток} = 100$ мВ)	0,6	0,556	0,597	0,57 %
$I_{ds}$ , А/мкм ( $V_{сток} = 3,0$ В; $V_{затвор} = 3,3$ В)	$5,66 \times 10^{-4}$	$6,25 \times 10^{-4}$	$5,65 \times 10^{-4}$	0,13 %

Полученные результаты с достаточной точностью воспроизводят экспериментальные данные, что свидетельствует о высокой эффективности разработанных методов и программного обеспечения. Оптимизированный технологический процесс в дальнейшем использован в процессе сквозного статистического проектирования технологии/прибора/схемы.

На следующем этапе проведена экстракция SPICE-параметров *n*-МОП-транзистора с 0,35 мкм проектными нормами с использованием модуля Utmost, входящего в программный комплекс компании Silvaco. В качестве модели, параметры которой экстрагировались, выбрана стандартная модель BSIM версии 3.3 [5], адекватно описывающая электрические характеристики *n*-МОП-транзистора с 0,35 мкм проектными нормами.

Далее представлены результаты статистического анализа технологического процесса изготовления МОП-транзистора и электрических характеристик приборной структуры, а также исследования разбросов электрических характеристик типичных цифровой и аналоговой (дифференциальный усилитель) схем на основе данного прибора.

Влияние статистических флуктуаций параметров технологии формирования элементной базы (приборов) на выходные характеристики технологического процесса исследовалось с использованием модуля технологического моделирования Athena программного комплекса компании Silvaco и регрессионного анализа [3].

Значимость параметров отдельных операций технологического маршрута изготовления *n*-канального МОП-транзистора определяется относительно их влияния на пороговое напряжение  $V_{th}$  как один из наиболее важных параметров МОП-транзистора. Для исследования

значимости и степени влияния параметров технологического процесса на пороговое напряжение МОП-транзистора в соответствии с планом Плакетта-Бермана проведена серия компьютерных экспериментов, моделирующих технологический маршрут изготовления приборов и их электрические характеристики, для 10 факторов.

По результатам отсеивающего эксперимента выбраны пять наиболее значимых входных технологических параметров: доза имплантации  $D_1$  при формировании кармана; энергия имплантации  $E_1$  при формировании кармана; температура  $T_1$  окисления для создания подзатворного окисла; температура окисления  $T_2$  при формировании слейсера; температура  $T_3$  при отжиге имплантированной примеси. Принятые в расчетах номинальные значения входных параметров:  $D_1 = 3,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $E_1 = 50 \text{ кэВ}$ ,  $T_1 = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_3 = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Исследуемыми выходными характеристиками технологического процесса были выбраны: толщина подзатворного диэлектрика  $T_{ox}$ ; концентрация примеси в области канала  $C_k$ ; концентрация примеси в областях истока/стока  $C_s$ ; слоевое сопротивление  $R_{sh}$ . Выходные характеристики, анализируемые на этапе проектирования прибора были следующие: пороговое напряжение  $V_{th}$ ; ток стока в режиме насыщения при 3,3 В  $I_{ds}$ ; напряжение пробоя при смыкании областей истока и стока  $V_{br}$ .

Для построения аппроксимационных зависимостей выходных характеристик технологического маршрута формирования структуры  $n$ -МОП транзистора от входных параметров значимых технологических операций согласно выбранному плану экспериментов (ортогональный центральный композиционный план) проведена серия компьютерных расчетов. Для дозы имплантации  $D_1$  и энергии имплантации  $E_1$  задан разброс, равный  $\pm 5\%$ , для температур  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  задан разброс, равный  $\pm 1\%$ .

Моделирование схемы D-триггера и дифференциального усилителя на базе сформированного  $n$ -МОП-транзистора проводилось с использованием программного пакета компании Cadence. Исследование статистического разброса значимых характеристик исследуемых схем реализовано в режиме статистического анализа в цикле Монте-Карло (200 итераций). После определения наиболее значимых SPICE-параметров посредством проведения анализа малосигнальной чувствительности (SENS-анализ) выходного напряжения к изменению значений SPICE-параметров было проведено моделирование электрических характеристик D-триггера и дифференциального усилителя. Отклонения значений SPICE-параметров от номинальных составляют 20%. Обобщенные результаты статистического анализа технологии/прибора/ схемы, включающие величины разброса выходных характеристики на каждом из этапов моделирования, сведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты сквозного статистического проектирования технологии/прибора/схемы

Проектирование технологии			
Параметр	$T_{ox}$	$C_{ch}$	$R_{sh}$
Разброс значений, %	10	15	9,5
Проектирование прибора			
Параметр	$V_{th}$	$V_{pr}$	$I_{ds}$
Разброс значений, %	21	1,8	19
Проектирование схемы (цифровая)			
Параметр	Время задержки переднего фронта	Время задержки заднего фронта	
Разброс значений, %	20	19	
Проектирование схемы (аналоговая)			
Параметр	Коэффициент усиления дифференциального усилителя	Крутизна дифференциального усилителя	
Разброс значений, %	38	35	

### Заключение

Предложен комплексный подход к реализации сквозного статистического проектирования изделий микроэлектроники, включающий процедуры статистического анализа и оптимизации параметров моделей приборно-технологического проектирования интегральных микросхем, который позволяет не только учитывать влияние флуктуаций параметров технологии на выходные характеристики прибора/схемы/системы, но и обеспечивает

адаптацию используемых средств проектирования к конкретной производственной среде (технологическому процессу).

Результаты оптимизации параметров технологического процесса, экстракции параметров сформированного 0,35 мкм *n*-МОП-транзистора, а также данные сквозного статистического проектирования исследуемого прибора на уровнях технологии, схемы и системы подтвердили эффективность разработанных методов и алгоритмов для проектирования изделий микроэлектроники. Установлено, что при отклонении величин технологических параметров с 1 до 5 % от номинального, разброс выходных характеристик прибора может достигать 20 %, а для схемотехнических решений – от 20 % для цифровых до 35% для аналоговых.

## **OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS AND VERIFICATION OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF THE 0.35 $\mu\text{m}$ MOSFET**

TRAN TUAN TRUNG, V.R. STEMPIISKY, S.A. SOROKA

### **Abstract**

The description of the original integrated approach to solving the problem of statistical analysis in microelectronic products design process from the design of the technological routine to the system design. Testing of this methodology is described by investigating the influence of process parameters on dispersion structural and electrical characteristics of 0.35 micron MOS transistor, and the characteristics of the analog and digital circuit solutions.

### **Список литературы**

1. *Krasikov M., Nelayev V., Stempitsky V. et. al.* // Proc. of the SPIE. 2009. Vol. 7377–40.
2. *Maly W., and Strojwas.* // IEEE Trans. Computer-Aided Design. 1982. Vol. 1, № 2. P. 120–131.
3. *Кулешов А.А., Малышев В.С., Нелаяев В.В. и др.* // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 31. С. 47–61.
4. 0,35  $\mu\text{m}$  CMOS Electrical Specification, Technology Specification // Fraunhofer Institute Silicon Technology, Mar. 2007. 0,35  $\mu\text{m}$  CMOS Basic flow chart, Technology Specification // Fraunhofer Institute Silicon Technology, Feb. 2007.
5. *Chenming Hu and Yuhua Cheng.* MOSFET modeling & BSIM3 User's Guide. New York, 1999.