РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2025, том 12, выпуск 2, с. 90–101

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ

УДК 621.382.049.77.002 EDN QOSIAM

Физико-аналитическая подсистема приборно-технологического моделирования силового МОП-транзистора с вертикальным каналом

П. С. Приходько, *д. т. н., проф., prikhodko.ps@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Ю. А. Романов, *contact@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Авторами предложена подсистема автоматизированного приборно-технологического моделирования, предназначенная для анализа физических основ создания силового МОП-транзистора с вертикальным каналом и использующая иерархическую структуру представления данных конструктивно-технологической модели. Иерархическая структура имеет пять уровней структурирования данных. Это обеспечивает возможность их многоуровневого преобразования и в конечном счете делает возможным учет отдельных физических явлений, протекающих при проведении технологического процесса в составе маршрута изготовления полупроводникового прибора. Эта структура существенно облегчает оптимизацию, модификацию и отладку данной подсистемы.

Подсистема реализована на основе авторского языка задания команд проектирования Proterozoic, разработанного с учетом возможного существенного расширения функциональных возможностей. Язык Proterozoic является диалектом языка Лисп и характеризуется чрезвычайной простотой. При выполнении команд проектирования могут быть подключены пользовательские модули, определяющие работу с данными иерархической структуры на всех пяти уровнях.

Подсистема ориентирована на разработку и исследование технологических процессов, связанных с травлением либо осаждением (эпитаксиальным наращиванием, осаждением из газовой фазы, напылением) кремния, диоксида кремния, нитрида кремния, формированием металлизации. При помощи данной подсистемы может быть получена конструктивно-технологическая модель силового МОП-транзистора, пригодная для экстракции электрофизических параметров и позволяющая впоследствии оценить влияние особенностей и параметров технологических процессов на характеристики полупроводниковых структур.

Коррекция такой модели на этапе изготовления позволит оптимизировать технологический маршрут изготовления с учетом особенностей имеющегося технологического оборудования.

Ключевые слова: МОП-транзистор с вертикальным каналом, приборно-технологическое моделирование

Для цитирования: Приходько П. С., Романов Ю. А. Физико-аналитическая подсистема приборно-технологического моделирования силового МОП-транзистора с вертикальным каналом. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2025. Т. 12. № 2. С. 90–101.

©Приходько П. С., Романов Ю. А., 2025

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2025, том 12, выпуск 2, с. 90–101

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ

Physical-Analytical Subsystem for the Device and Process Design of a Power U-MOSFET

P. S. Prikhodko, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., prikhodko.ps@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Yu. A. Romanov, *contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. A subsystem of device and process automated design intended for the analysis of the physical principles of creating a power U-MOS transistor is proposed. The subsystem employs a hierarchical structure for representing data of the design and technological model. The hierarchical structure has five levels of data structuring. This provides the possibility of their multi-level transformation and makes it possible to take into account individual physical phenomena occurring during the technological process as part of the route of manufacturing a semiconductor device. Such a structure significantly facilitates the optimization, modification and debugging of the subsystem.

The subsystem has been implemented on the basis of the Proterozoic authoring language for specifying design commands. It has been developed with consideration of the possible significant expansion of the language's functional capabilities. The language is a Lisp dialect and is characterized by extreme simplicity. When executing design commands, user modules, which determine the work with data of the hierarchical structure at all five levels, can be connected.

The subsystem is focused on the development and study of technological processes related to the etching or deposition (epitaxial, vapor, sputtering) of silicon, silicon dioxide, silicon nitride, and metallization formation. With the help of this subsystem, a design and technological model of a power MOS transistor can be obtained. This model will be suitable for extracting electrophysical parameters, thus, allowing the subsequent evaluation of the influence of the features and parameters of technological processes on the characteristics of semiconductor structures.

Correcting such a model during the manufacturing stage will allow for the optimization of the manufacturing process route, taking into account the features of existing technological equipment.

Keywords: power U-MOSFET, device and process design

For citation: Prikhodko P. S., Romanov Yu. A. Physical-Analytical Subsystem for the Device and Process Design of a Power U-MOSFET. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2025. Vol. 12. No. 2. P. 90–101. (in Russian)

Введение

На сегодняшний день системы приборно-технологического моделирования играют определяющую роль в производстве полупроводниковых приборов по различным причинам.

Во-первых, с усложнением технологического маршрута изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем и ужесточением проектных норм возрастает роль побочных физических процессов формирования полупроводниковой структуры, которыми ранее можно было пренебречь.

Во-вторых, нельзя обойтись только экспериментальными исследованиями при поиске и оптимизации принципиально новых приборных структур и конструктивно-технологических решений. Кроме того, в некоторых случаях, когда экспериментальные исследования полученных приборов чрезвычайно дороги (например, радиационные испытания), в начале разработки крайне желательно заранее оценить их характеристики с использованием средств приборно-технологического моделирования [1, 2].

В-третьих, «предварительная отладка и оптимизация технологических процессов и конструкций с помощью приборно-технологического моделирования позволяет сократить этап запуска в производство.

В-четвертых, в условиях сокращения жизненного цикла полупроводниковых приборов сроки и стоимость этапа разработки новых изделий и технологий имеют определяющее значение» [5].

Такая роль систем приборно-технологического моделирования обусловила их бурное развитие, и если вначале это было лишь логическое продолжение разрозненных аналитических подходов, то на сегодняшний день возможно моделирование приборных структур на атомарном уровне с учетом квантово-механических явлений [3]. Подобные широчайшие возможности целесообразно было бы применить для численного исследования технологии изготовления силовых полупроводниковых приборов, например в цикле разработки силовых МОП-транзисторов с вертикальным каналом, с целью улучшения их технико-эксплуатационных характеристик.

Можно выделить следующие этапы цикла разработки любого силового полупроводникового прибора:

1) Техническое задание.

2) Выбор конструкции.

3) Аналитическая оценка характеристик элементов конструкции силового полупроводникового прибора.

4) Разработка технологического процесса изготовления силового полупроводникового прибора.

5) «Виртуальное производство» и «виртуальное измерение» электрофизических характеристик полупроводникового прибора, уточнение конструкции и технологии изготовления.

6) Изготовление опытно-экспериментальных образцов, коррекция конструкции и технологии изготовления.

7) Изготовление установочной партии изделий.

8) Серийное производство.

Среди этих этапов «виртуальное производство» и «виртуальное измерение» электрофизических характеристик относятся к конструктивно-технологическому моделированию. Как правило, данные инструменты разработки реализуются в рамках единой САПР. Пример «виртуального производства» из трех виртуальных установок и «виртуального измерения» трех электрофизических характеристик приведен на рис. 1.

Именно в рамках «виртуального производства» и «виртуального измерения» электрофизических характеристик было бы возможно численное исследование влияния особенностей процесса изготовления силового МОП-транзистора с вертикальным каналом на его характеристики. Однако на сегодняшний день разработчик «не допускается» внутрь виртуальной установки. Хоть такой подход и обеспечивает простоту взаимодействия разработчика с САПР, при этом скрывается физическая сущность процессов, протекающих внутри производственного оборудования. В ряде случаев это может привести к трудностям, связанным с несоответствием моделей, заложенных в САПР, реальным физическим процессам, происходящим на реальном оборудовании, используемом при производстве полупроводниковых приборов. В этом случае требуется дополнительная коррекция конструктивно-технологической модели силового полупроводникового прибора,

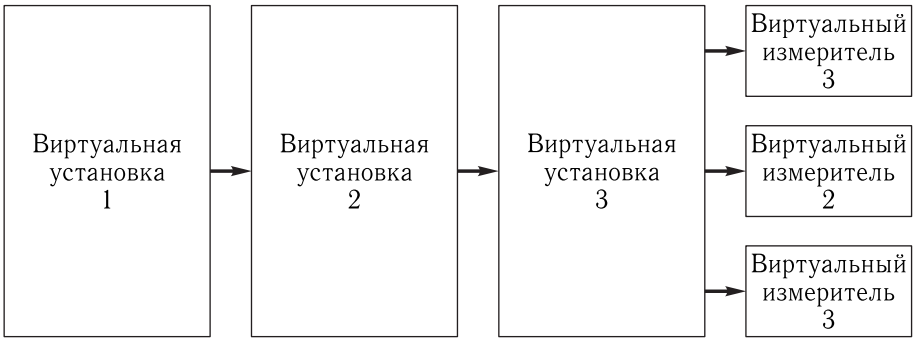

Рис. 1. Базовая структура виртуального производства и виртуального измерения электрофизических характеристик
Fig. 1. Basic structure of virtual manufacturing and virtual measurement of electrophysical characteristics

при этом модель, учитывающая соответствующие физические процессы, должна закладываться в САПР извне, в результате структура «виртуального производства» будет иметь вид, аналогичный представленному на рис. 2.

Однако на сегодняшний день отсутствуют САПР, предоставляющие подобные возможности. Работы по учету физических процессов технологического цикла производства полупроводниковых приборов на этапе «виртуального производства», которыми ранее пренебрегали и которые при ужесточении проектных норм и повышении требований к характеристикам производимых приборных структур могут выходить на передний план, найти не удалось, хотя и имеются работы по модификации «виртуального измерения» электрофизических характеристик [4].

Целью данной работы как раз и является построение такой подсистемы приборно-технологического моделирования, которая позволила бы «заглянуть внутрь» виртуальной установки, с помощью которой можно было бы исследовать и оптимизировать процесс изготовления силового полупроводникового прибора, в частности силового МОП-транзистора с вертикальным каналом, с целью получения более совершенных технико-эксплуатационных характеристик.

Такая подсистема должна обладать следующими свойствами:

1) обладать «дружественным» интерфейсом;
2) может читать и записывать файлы в формате, применимом в базовой САПР приборно-технологического моделирования.

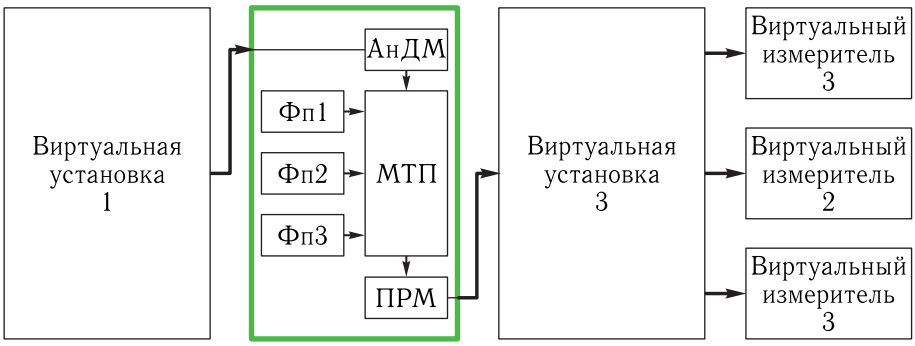

Рис. 2. Предлагаемая структура виртуального производства. АнДМ — анализ данных конструктивно-технологической модели, Фп1, Фп2, Фп3 — закладываемые в модель описания физических процессов, МТП — модель технологического процесса, ПРМ — преобразование результатов моделирования для совместимости с форматом передачи данных используемой САПР
Fig. 2. Proposed structure of virtual production. АнДМ — analysis of data of the design and technological model, Фп1, Фп2, Фп3 — descriptions of physical processes embedded in the model, МТП — model of the technological process, ПРМ — transformation of modeling results for compatibility with the data transmission format of the CAD system used

3) может учитывать физические процессы, задаваемые пользователем, за счет иерархической реляционной структуры конструктивно-технологической модели разрабатываемого полупроводникового прибора.

Учет физического процесса в качестве параметра все же подразумевает ограничение по физической сущности базового технологического процесса, например если в качестве базового выбран процесс осаждения–травления, в него бессмысленно передавать какие-либо физические процессы, не связанные с осаждением либо травлением исследуемой области приборной структуры. Данная работа будет посвящена особенностям моделирования процессов осаждения и травления, на примере которых будет продемонстрировано устройство подсистемы конструктивно-технологического проектирования, в первую очередь предназначенной для построения конструктивно-технологической модели силового МОП-транзистора с вертикальным каналом с возможностью последующего исследования особенностей формирования металлизации.

Процессы осаждения либо травления моделируются алгоритмом струны [5–9] и его вариациями, которые позволяют учесть различные эффекты, например затенение, анизотропию травления и прочие.

«В модели струны граница между внешней средой и поверхностью, на которой осуществляется процесс осаждения либо травления, аппроксимируется набором точек (которые являются точками закрепления струны), соединенных между собой прямыми отрезками (сегментами струны). Результирующий профиль поверхности в результате воздействия определяется положением первоначального профиля, который двигался через среду с учетом скорости движения струны в точках закрепления.

При моделировании травления или осаждения алгоритм продвижения струны состоит в следующем:

1) в каждый текущий момент времени определяется локальная скорость передвижения в точках закрепления струны;
2) по значению локальной скорости рассчитывается перемещение точки за заданный временной интервал;
3) после перемещения точки вновь соединяются прямыми отрезками — сегментами струны, которые составляют результирующее положение фронта травления либо осаждения в следующий момент времени» [5].

В базовый алгоритм продвижения струны, который описывает базовый процесс осаждения–травления, также следует включить ограничения по длине сегментов струны — разбиения при превышении максимальной длины сегментов либо исключение точек при достижении длины сегментов меньше указанной. А вот скорости передвижения в точках закрепления как раз описываются передаваемым физическим процессом (фактически передается функция для вычисления скорости передвижения в каждой точке, при этом разные функции могут принимать в качестве аргументов одни и те же параметры). В результате будет возможно анализировать процессы осаждения либо травления диэлектриков и напыления металла, являющиеся критическими для микроэлектронной технологии.

Для хранения промежуточных данных конструктивно-технологической модели требуется сложная структура, например аналогичная той, что сохраняется в файлах формата DF-ISE. Даже поверхностный анализ содержимого такого файла показывает наличие большого количества взаимосвязанных данных, причем ошибка в структуре этих данных приведет к полной неработоспособности системы в целом. Сложность данной структуры и ее несовместимость с идеей учета физических процессов приводит к необходимости построения принципиально новой структуры данных. Эта структура должна постепенно упрощать работу с данными за счет нескольких уровней их представления, обеспечивая плавный переход от «сырого» представления данных до абстрактного описания физических процессов. При этом вышележащий уровень опирается на данные нижележащего, что естественным образом определяет иерархию внутренних уровней представления данных. Также эта структура должна сохранять взаимосвязи между данными на каждом отдельном уровне, а также между уровнями, то есть быть реляционной. Такая иерархическая реляционная структура данных в конечном счете позволит решить задачу такого преобразования данных, которое не вносит противоречий в их структуру, полностью соответствует тем изменениям, которым бы подверглась

реальная полупроводниковая структура под воздействием реального технологического процесса и при этом отражает воздействие тех физических процессов, роль и влияние которых требуется исследовать для оптимизации электрофизических характеристик изготавливаемого прибора. На нижнем уровне такой системы производится работа с «сырыми» данными, а на самом верхнем — работа с физическими основами создания полупроводникового прибора. Идея построения подсистемы, использующей подобную структуру данных, является новой в области моделирования силовых полупроводниковых приборов. Ближайшая по смыслу найденная публикация [10] описывает пакет моделирования полупроводниковых элементов интегральных схем (но не затрагивающий технологию их изготовления), где реализована возможность иерархического упрощения либо усложнения физико-математической модели для расчета параметров интегральной схемы с произвольно задаваемой конструкцией. При этом под иерархичностью, по-видимому, подразумевается возможность добавления либо удаления дифференциальных уравнений, входящих в состав решаемой системы.

Таким образом, чтобы достичь поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать интерфейс взаимодействия.
2. Разработать иерархическую реляционную структуру представления данных подсистемы приборно-технологического моделирования.
3. Реализовать подсистему приборно-технологического моделирования.

Интерфейс взаимодействия

Помимо чтения и записи данных в подсистеме конструктивно-технологического моделирования требуется указывать действия, которые необходимо произвести над этими данными. Учитывая многоуровневость подсистемы, командный язык должен обеспечивать широкий спектр возможностей при простоте его реализации. Для этого мог бы подойти диалект языка Лисп, открывающий широкие возможности по созданию дополнительных модулей для рассматриваемой подсистемы и обеспечивающий необходимый интерфейс взаимодействия со средой приборно-технологического моделирования.

В АО «Российские космические системы» был разработан язык Proterozoic, являющийся диалектом языка Лисп и реализующий минимальные базовые возможности языка программирования. Структура командного файла, обрабатываемого соответствующим интерпретатором, представляет собой набор вложенных списков, первый элемент каждого списка — имя функции, а последующие члены списка — аргументы этой функции, которые также могут быть списками, которые в ряде случаев нужно преобразовывать, чтобы получить значения аргументов.

Работа интерпретатора заключается в чтении командного файла с использованием конечного автомата с созданием промежуточной структуры данных и выполнением команд, опираясь на эту структуру. Командный файл описывает структуру, состоящую из вложенных списков, каждый из которых состоит из списков либо из так называемых атомов — хранилищ данных (строк, целых чисел, имен переменных и т. п.). Схема конечного автомата представлена на рис. 3. Здесь m — исполняемая команда, \ — символ перехода в командный режим, (— начало списка,) — конец списка, c — обычный символ, “ — кавычки (начало либо конец строки), n — переход на новую строку, t — символ табуляции или пробела, @ — символ начала либо окончания многострочного комментария. Как видно из структуры конечного автомата, есть возможность комментирования кода, а также три режима работы: запись обычного атома, атома-строки и командный режим.

Proterozoic позволяет задавать команды преобразования данных конструктивно-технологической модели. Для представления этих данных в пригодном для взаимодействия с базовой САПР виде выбран формат DF-ISE, позволяющий передавать всю необходимую информацию между средой проектирования и программным модулем и получивший широкую поддержку в современных САПР. Данный формат предполагает наличие двух файлов — файла сетки и файла данных, структура которых представлена на рис. 4.

Как видно из рис. 4, файлы с данными конструктивно-технологической модели не содержат (и не могут содержать) информацию в виде, пригодном для непосредственного анализа. Огромный

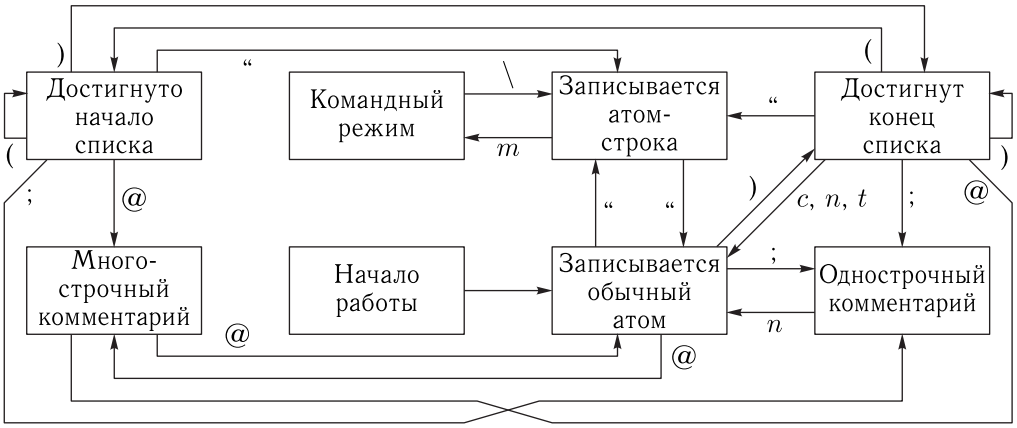

Рис. 3. Схема конечного автомата интерпретатора
Fig. 3. Scheme of the finite-state automaton interpreter

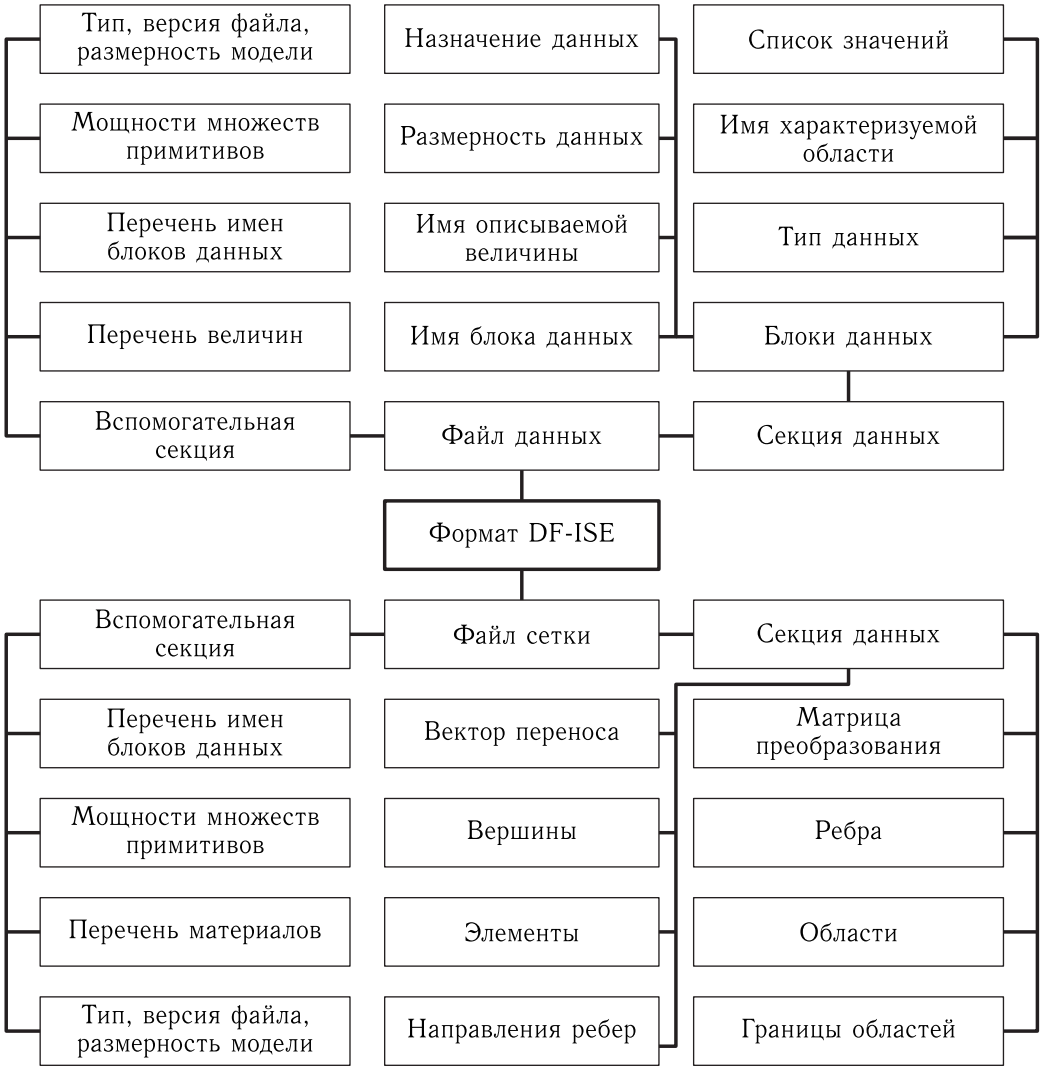

Рис. 4. Структура файлов формата DF-ISE
Fig. 4. Structure of DF-ISE format files

разрыв между такой формой представления данных и требуемым функционалом, позволяющий задавать и численно анализировать физические процессы, протекающие при создании структуры полупроводникового прибора, чрезвычайно сложно ликвидировать непосредственно при помощи «монолитного» решения. Это приводят к необходимости разбиения данной задачи на более простые, т. е. к необходимости ступенчатого взаимно-однозначного преобразования данных с добавлением минимально необходимых связей между ними для ускорения работы. Это, в свою очередь, приводит к иерархической реляционной структуре представления данных подсистемы приборно-технологического моделирования.

Иерархическая реляционная структура представления данных подсистемы приборно-технологического моделирования

Иерархическая реляционная структура подсистемы приборно-технологического моделирования представлена на рис. 5 и включает в себя пять уровней.

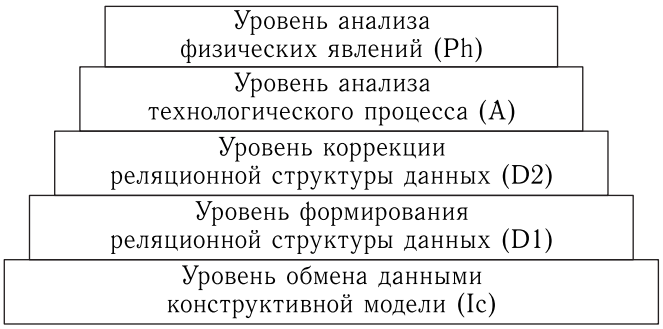

Рис. 5. Иерархическая структура подсистемы приборно-технологического моделирования
Fig. 5. Hierarchical structure of the device and process design subsystem

В АО «Российские космические системы» создан программный модуль Protoplasma, реализующий данную реляционную структуру представления данных и в качестве интерфейса взаимодействия использующий описанный выше язык. Данный программный модуль может эксплуатироваться как самостоятельный программный продукт, так и в составе стандартной системы автоматизированного проектирования полупроводниковых приборов.

На самом нижнем уровне (Ic) происходит исключительно передача данных между базовой САПР и модулем Protoplasma. На этом уровне осуществляется поддержка формата файлов DF-ISE (или любого другого, требуемого для совместной работы с используемой системой конструктивно-технологического проектирования полупроводниковых приборов).

Анализ взаимосвязей, не представленных явно на уровне Ic, приводит к выделению различных множеств, отраженных в таблице, часть из них явно присутствует на уровне D1, часть — на уровне D2.

Таблица. Обозначение составляющих конструктивно-технологической модели конструкции силового МОП-транзистора с вертикальным каналом

Обозначение	Наименование
Ω	Базовое множество точек
E	Подмножество множества точек
P	Данные, сопоставленные точкам
T	Данные, сопоставленные элементам
Λ	Множество ребер
Ξ	Множество элементов из трех ребер
X	Множество элементов из трех точек
R	Множество областей
$[X]$	Замыкание области токами
$[\Xi]$	Замыкание области ребрами
L	Направления граней
M	Множество материалов

На уровне D1 формируется реляционная структура, позволяющая по любому элементу определить, к какой полупроводниковой области данный элемент относится, какие значения физических величин для него определены в рамках рассматриваемой модели. Структура уровня D1 в упрощенном виде представлена на рис. 6 и является общей для любых полупроводниковых приборов, модель которых представима в формате DF-ISE.

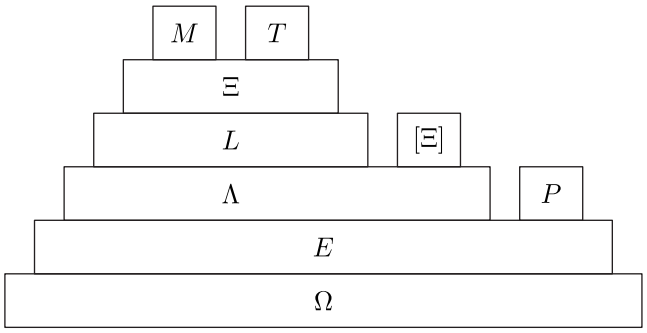

Рис. 6. Уровень формирования реляционной структуры данных (D1)
Fig. 6. Formation level of relational data structure (D1)

Реляционная структура, сформированная на уровне D1, в ряде задач, например применительно к описанию технологических процессов осаждения-травления (такое описание встречается при решении задачи моделирования технологического процесса формирования металлизации силового МОП-транзистора с вертикальным каналом), является избыточной. Поэтому вводится дополнительный уровень D2, позволяющий в необходимой мере упростить структуру D1, сохраняя при этом между D1 и D2 взаимно-однозначное соотношение. Структура уровня D2 в упрощенном виде представлена на рис. 7. «Компактность» уровня D2 достигается за счет оптимальных взаимосвязей между элементами конструктивно-технологической модели. Структура уровня D2 отражает базовый технологический процесс и может быть общей для полупроводниковых приборов разных типов.

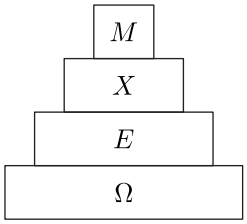

Рис. 7. Уровень коррекции реляционной структуры данных (D2)
Fig. 7. Correction level of relational data structure (D2)

На уровне A (внутренняя структура которого также продиктована исключительно сущностью базового технологического процесса) происходит работа непосредственно с конструктивно-технологической моделью — добавление, удаление либо редактирование ее элементов (точек, ребер, элементов, областей). Применительно к модели осаждения–травления здесь работает алгоритм струны, продвигающейся внутрь полупроводниковой структуры (в случае модели травления) либо наружу (в случае модели осаждения). Скорость продвижения струны в каждой точке определяется на высшем уровне — уровне анализа физических явлений Ph.

Связь уровня Ph через нижележащие уровни с базовой системой автоматизированного проектирования позволяет экстрагировать электрофизические параметры разрабатываемого полупроводникового прибора. В конечном счете возможно организовать «мост» между параметрами стандартного или нового технологического процесса и технико-эксплуатационными характеристиками, например разрабатываемого силового МОП-транзистора с вертикальным каналом. При использовании микрофотографий сколов транзисторов и измерений электрофизических характеристик и такой настройке физического уровня, которая приводит к наилучшему соответствию модели полученным экспериментальным результатам, предлагаемая подсистема приборно-технологического моделирования способна заменить парк исследовательского оборудования, применение которого не всегда целесообразно в случае, если разрабатываемый прибор должен изготавливаться на оборудовании для серийного производства.

Уровень Ph может нести в себе специфику конструкции разрабатываемого полупроводникового прибора. В частности, особенности конструкции и топологии силового МОП-транзистора с вертикальным каналом могут накладывать требования на учет определенных физических процессов, обусловливающих формирование металлизации, поскольку это влияет на конечное сопротивление в открытом состоянии.

Подсистема приборно-технологического моделирования

Данная подсистема создана на базе стандартной системы автоматизированного проектирования полупроводниковых приборов, в которую был добавлен модуль Protoplasma.

В базовой системе применена структура организации модулей, аналогичная приведенной на рис. 2 и 3, однако в одном модуле может находиться несколько «виртуальных установок». Пробная версия иерархической подсистемы приборно-технологического моделирования реализована как с использованием авторских модулей (где осуществлена возможность реализации иерархии уровней), так и с использованием модулей базовой системы автоматизированного проектирования (для «виртуальных установок», удовлетворительно описывающих модели технологических процессов).

На рис. 8 приведено окно с кодом авторского модуля Protoplasma (язык Proterozoic). Показана возможность задания переменных (setq) и пользовательских функций (defun), а также загрузки модулей (load). В Proterozoic всего три ключевых слова, которые позволяют полностью определить логику работы любой пользовательской программы. Все необходимые функции для работы с данными подключаются в составе компилируемых модулей, создаваемые пользователем. В составе этих же модулей пользователь может доопределить даже синтаксис языка, например определить собственные ключевые слова для задания циклов обработки данных.

Разбиение процесса моделирования технологии изготовления силового МОП-транзистора с вертикальным каналом на 19 модулей (10 от базовой

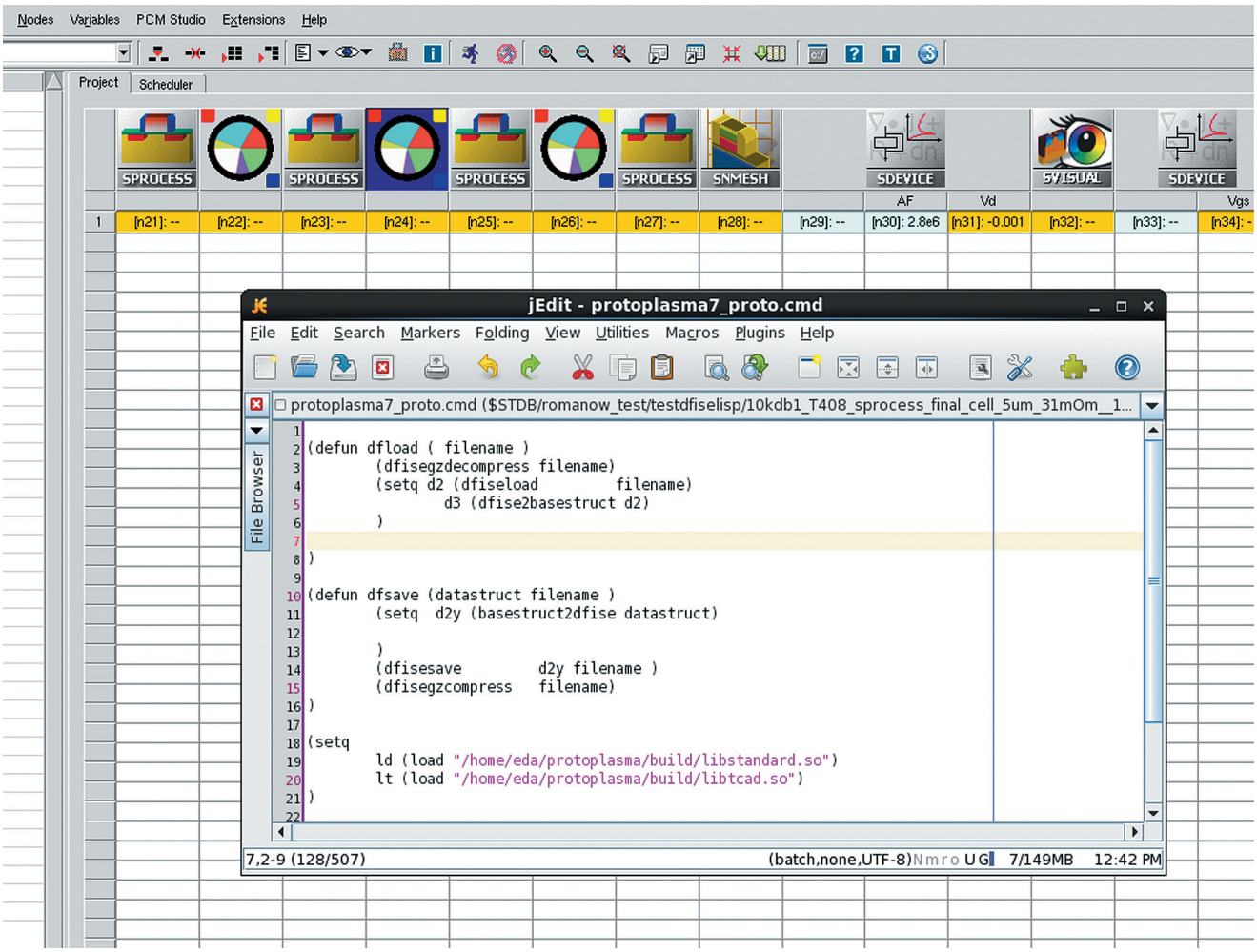

Рис. 8. Protoplasma. Окно редактора с кодом, описывающим процедуры чтения и записи данных конструктивно-технологической модели

Fig. 8. Protoplasma. Editor window with the code describing the procedures of reading and writing data of the design and technological model

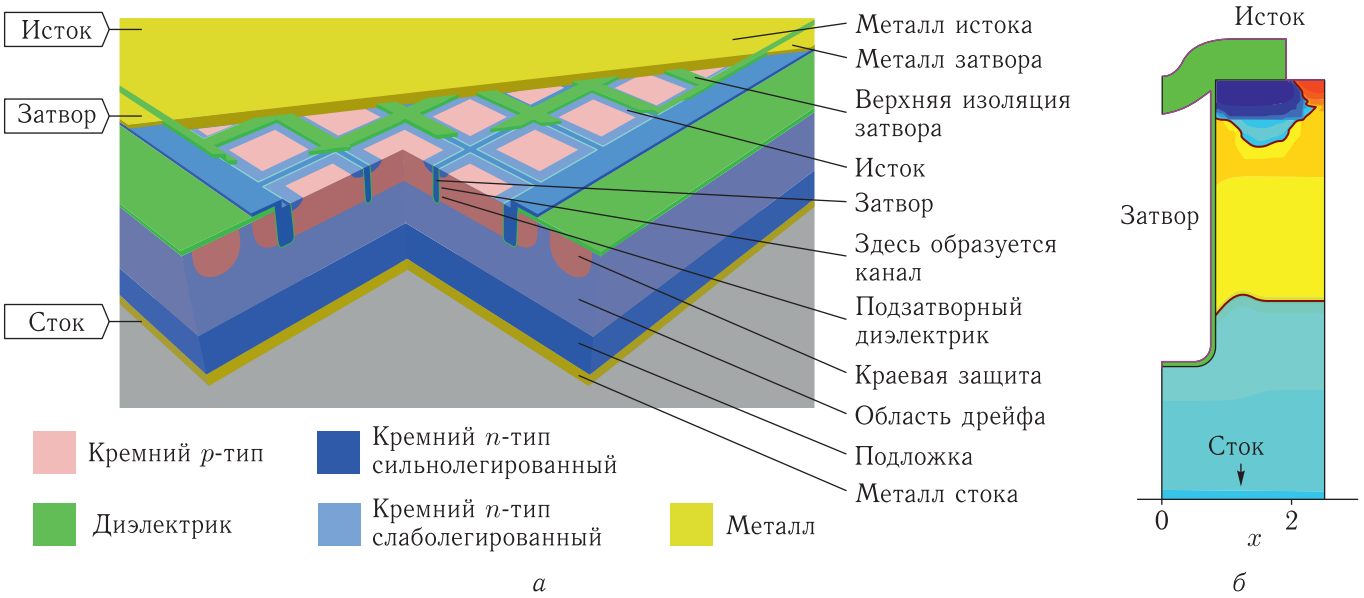

Рис. 9. *а* — структура кристалла силового МОП-транзистора с вертикальным каналом; *б* — двумерная модель, построенная с использованием иерархической подсистемы приборно-технологического моделирования
Fig. 9. *а* — structure of a power U-MOSFET chip; *б* — two-dimensional model built using the hierarchical subsystem of device and process design

системы и 9 пользовательских) и успешное выполнение всего полученного «потока моделирования» продемонстрировало отказоустойчивость Protoplasma, полную совместимость с базовой системой автоматизированного проектирования (что говорит о полностью реализованной поддержке формата DF-ISE) и возможность успешной экстракции электрофизических параметров, в частности сопротивления в открытом состоянии (для выбранной конструкции оно составило 40 мОм) (рис. 9, *а*, *б*).

Заключение

Реализация подсистемы приборно-технологического моделирования, которая оказалась возможна после разработки ядра программного модуля Protoplasma (основой которого является иерархическая структура представления данных подсистемы приборно-технологического моделирования) и интерфейса взаимодействия программного модуля с пользователем (на основе языка Proterozoic) позволила достичь поставленной цели — создания расширяемой подсистемы приборно-технологического моделирования, которая при добавлении соответствующего функционала позволит «заглянуть внутрь» виртуальной установки.

На примере данной подсистемы показана реализация новой многоуровневой структуры представления данных конструктивно-технологической модели полупроводникового прибора (в частности, силового МОП-транзистора с вертикальным каналом). Данная структура устраняет ряд затруднений при практической реализации и последующем использовании. Тестирование программного модуля на базе стандартной системы автоматизированного проектирования полупроводниковых приборов показало пригодность всей системы не только для практических расчетов, но и для отладки в процессе внедрения пользовательских моделей технологических процессов. Полученное в результате тестирования значение сопротивления силового МОП-транзистора с вертикальным каналом соответствует действительности, что говорит о пригодности системы к практическим расчетам. Полученные результаты открывают возможность более детального изучения маршрута изготовления силового МОП-транзистора с вертикальным каналом за счет возможности гибкого ввода пользовательских моделей технологических процессов.

Из полученной конструктивно-технологической модели возможна экстракция электрофизических параметров стандартным средствами базовой системы автоматизированного проектирования. Экстрагируемым параметром может быть, например, сопротивление в открытом состоянии силового МОП-транзистора с вертикальным каналом (а также заряд затвора, пробивное напряжение «сток–исток» и т. д.).

Список литературы

1. Research of SEB effects in trench IGBT based on the TCAD simulation / Y. Gong, X. Chen, Z. Li et al. // Microelectronics Reliability, 2024, vol. 162. P. 115517.
2. TCAD Analysis of Single-Event Burnout Hardness for an Improved CoolSiC Trench MOSFET / D.-X. Chen, Y. Wang, Y.-X. Song et al. // IEEE Transactions on Electron Devices, 2024.
3. Industrial TCAD: modeling atoms to chips / M. A. Stettler, S. M. Cea, S. Hasan et al. // IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, vol. 68, № 11. P. 5350–5357.
4. *Петросянц К. О.*, *Коухов М. В.*, *Попов Д. А. и др.* Анализ влияния радиационных эффектов на характеристики операционного усилителя с использованием универсальной SPICE-RAD-модели биполярных транзисторов // Известия вузов. Электроника, 2024, т. 29, № 5. С. 640–657. https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vliyaniya-radiatsionnyh-effektov-na-harakteristiki-operatsionnogo-usilitelya-s-ispolzovaniem-universalnoy-spice-rad-modeli (Дата обращения 16.03.2025).
5. *Королев М. и др.* Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. Часть 1. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010.
6. *Земнов К. Э.* Обзор методов моделирования процесса травления / К. Э. Земнов, Е. Д. Чащин, И. М. Белова. Научные исследования: от теории к практике / Материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 12 февр. 2017 г.). В 2-х т. Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2017, т. 1, 1 (11). С. 31–35.
7. *Kuboi N.* Review and future perspective of feature scale profile modeling for high-performance semiconductor devices // Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2023, vol. 22. P. 041502–041502.
8. *Zhang P.*, *Li D.* The features of surface charging on rectangle mask holes in plasma etching // Phys. Plasmas, 2022, vol. 29(10). P. 103506.
9. *Zhang P.* Charging Issues on the Rectangle Mask Line During Plasma Etching with Consideration of Electron-Solid Interaction // Brazilian Journal of Physics, 2023, vol. 53. P. 124.
10. *Пензин О. Ю.* Анализ и моделирование физических процессов в полупроводниковых приборах с помощью программы ПЕГАС // Автометрия, 1994, № 1. С. 94–100.

Дата поступления рукописи
в редакцию 17.03.2025
Дата принятия рукописи
в печать 12.05.2025