

Информационные технологии в нанoeлектронике

Тарнавский Г. А., Анищик В. С., Жибинов С. Б.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
НИИ прикладной информатики СибГУТИ

1. Введение

Информационный портал «All about MEMS» [1] содержит сведения о производителях микроэлектромеханических систем (МЭМС) в широком спектре их применения, от аппаратуры и систем для космической и автомобильной техники до струйных принтеров и медицинской аппаратуры.

В небольшом обзоре [2], который представляет весьма полезным, делается экскурс в этот портал с целью краткого описания содержащейся там информации с указанием областей деятельности (и производимой продукции) ряда ведущих мировых фирм (рис. 1).

Микроэлектромеханические системы, содержащие разнообразные полупроводниковые гетероструктуры (см. [3]), являются в настоящее время основой нано- и микроэлектроники. Сфера их применения в различных областях науки и техники исключительно велика (см. [4]). Вследствие этого весьма важным представляется обмен информацией о МЭМС-технологиях, используемых в одних сегментах электроники при конструировании и производстве МЭМС-устройств, для приложений в других.

В представляемой работе проводится обзор распространяемых через Интернет некоторых программных комплексов (software) для компьютерного проектирования как различных МЭМС-устройств в целом, так и моделирования отдельных сегментов технологического цикла их промышленного производства. Производство полупроводниковых материалов, включающих в себя МЭМС, опирается на современные КМОП («кремний-металл-оксид-полупроводник») и КНИ

(«кремний-на-изоляторе»)-технологий (см., например, [5,6]). Эти технологии используют сложные электрофизические, термохимические и механические процессы. В связи с их большим количеством и разнообразием (например, производство микропроцессоров Intel и AMD имеет около 300 стадий технологического цикла, см. [7]) представляются **только** комплексы, содержащие программы компьютерного моделирования травления, оксидирования и отжига кремниевой подложки с имплантированными в нее легирующими примесями донорного (фосфор, сурьма, мышьяк) и акцепторного (бор, галлий) типов для формирования особых гетероструктур – зон повышенной n- и p-проводимости для организации диодов, транзисторов (рис. 2), конденсаторов, резисторов и других элементарных МЭМС-устройств, составляющих большие, сверхбольшие и ультрабольшие интегральные схемы (БИС, СБИС и УБИС) электронных приборов.

Одним из наиболее сложных для моделирования и важным в КНИ-технологиях является процесс оксидирования. Физико-математические модели роста пленки оксида пока недостаточно проработаны. Эти модели основаны на классической модели «птичьего клюва» [8] и ее последующих модификаций. В настоящее время разрабатываются более современные модели, в частности, метод СТБН («сопряженных точек и виртуальных направлений», см. [9, 10]). При селекции программных комплексов для данной статьи преимущество отдавалось тем из них, которые содержат в своем инструментарии вычислительные средства расчета оксидирования кремния и роста пленки диоксида кремния.

Однако следует иметь в виду существование, кроме подобных программ, также и «смежных» программных комплексов типа [11] (обзор этих комплексов не вошел в данную статью), которые



Рис. 1. Силиконовая долина. Производство полупроводниковых материалов и приборов



Рис. 2. Принципиальная схема элементарного полупроводникового транзистора, составляющего основу больших интегральных схем (несколько миллионов элементарных транзисторов на кристалле)

могут быть использованы в проектировании и исследовании характеристик МЭМС-приборов. Заметим, в [7] совершенно справедливо указывается, что «в настоящее время отсутствуют публикации, в которых отмечались бы особенности использования программных систем для моделирования процессов в микро- и наномеханических элементах». Настоящая работа заполняет этот пробел.

Ниже рассматриваются предлагаемые фирмами-разработчиками к коммерческому использованию программные комплексы TCAD Sentaurus, IntelliSuite, CoventorWare, MEMS Pro Suite (MEMSCAP), Tsuprem, MicroTec [12–17], информация о которых имеется в Интернете.

2. Инструментарий TCAD Sentaurus

Программный комплекс TCAD Sentaurus [12] разработан фирмой Synopsys (США) при участии фирмы ISE (Швейцария) и является, на наш взгляд, самым мощным и наиболее распространенным в настоящее время (по крайней мере, в России) пользовательским инструментарием. Автоматизированная система приборно-технологического проектирования TCAD позволяет использовать компьютерное моделирование в качестве средства оптимизации технологических процессов полупроводникового производства и анализа работы полупроводниковых приборов.

Использование TCAD снижает стоимость производства не менее, чем на 50% за счет уменьшения числа экспериментов и сокращения затраченного времени.

Инструментарий TCAD Sentaurus – это платформа нового поколения, интегрированная из программных комплексов TCAD Synopsys и ISE TCAD Tool Suite. Инструментарий позволяет пользователю решать широкий спектр задач, – от создания глубокосубмикронной логики, памяти и цифроаналоговых приборов до сенсоров, оптоэлектроники и высокочастотной техники.

В состав Sentaurus входят программные разделы **Sentaurus Process**, **Sentaurus Device**, **Sentaurus Structure Editor**, **Sentaurus Workbench**, **Sentaurus TCAD for Manufacturing**.

Раздел **Sentaurus Process** содержит комплекс программ моделирования процессов производства кремниевых и сложных (составленных из слоев различных материалов) полупроводников. Главными из этих процессов являются: ионная имплантация, диффузия, оксидирование, травление, отжиг и эпитаксия. Раздел обеспечивает полное 3D моделирование маршрута технологии КМОП с возможностью вариации сегментов маршрутного плана, как с добавлением одних, так с исключением других сегментов, с целью создания наиболее функционально эффективных МЭМС и наиболее оптимального плана их производства.

Стремительное развитие новых технологий требует от инженеров понимания физических явлений, происходящих внутри структур МЭМС для

улучшения характеристик приборов. В частности, точность расчета механических напряжений (стресса) в области канала транзистора влияет на точность расчета тока в этом канале и, далее, на точность расчета интегральных характеристик транзистора и, следовательно, на точность логики БИС, СБИС или УБИС и, в результате, на получаемые параметры всего прибора.

Наличие в Sentaurus Process специализированной библиотеки MGOALS значительно упрощает построение физических 3D моделей и существенно сокращает затраты как машинного времени расчета задачи с перебором многочисленных вариантов, так и астрономического времени работы и интеллектуальных усилий пользователя. Например, один из сегментов MGOALS генерирует высококачественную 3D расчетную сетку с возможностью ослабления критерия Делоне вблизи границ разделов разных сред, что способствует уменьшению требуемого числа узлов и существенно снижает затраты компьютерного времени без ущерба для качества расчета.

Это позволяет использовать 3D модели оксидирования (вязкоэластичные, вязкожидкостные), основанные на современных и эффективных методах.

Для иллюстрации возможностей инструментария и самих принципов организации работы представим схему компьютерного моделирования одного (в инструментарии их значительно больше) физического процесса – механического стресса и его влияния на электропроводные свойства полупроводника.

В Sentaurus Process существенно расширены возможности для моделирования механического стресса – включена модель рассогласования параметров кристаллической решетки, которая позволяет контролировать продольные и сдвиговые напряжения, возникающие в канале SiGe транзистора и влияющие на ток. Модель учитывает также особенности структур на других, чем Si, подложках (SiC, GaN, AlGaIn) с постоянным расширением их номенклатуры.

Для расчета упругих свойств кремния в зависимости от кристаллографического направления атомной решетки введена модель анизотропной упругости. Раздел позволяет моделировать изгиб пластин, а также картину напряжений в пластинках, покрытых слоем тонких пленок.

Раздел Sentaurus Process предлагает ряд моделей, позволяющих точно описать воздействие стресса на подвижность носителей электрических зарядов. В библиотеке имеются как простые феноменологические модели, основанные на тензорезистивности, так и физические, более сложные модели. Одна из них учитывает индуцированные стрессом изменения верхнего края валентной зоны, что позволяет менять уровень механического напряжения в области канала до 1.5 ГПа. Для моделирования стресса до этого напряжения КМОП транзисторов с SiGe истоком и стоком имеющихся

в инструментарии средств обычно (к настоящему времени) вполне достаточно.

Следует кратко представить и другие разделы инструментария.

Раздел **Sentaurus Device** является комплексом программ нового поколения и ориентирован на моделирование электрических, термических и оптических характеристик кремниевых и сложных полупроводниковых приборов, включая транзисторы (как наноразмерные, так и крупные), датчики изображения, флеш-память, фотоизлучающие диоды, лазеры. Кроме того, раздел предоставляет возможность анализа предпосылок и пути устранения электростатического разряда, единичного случайного сбоя и кратковременной ошибки в схеме.

Функциональное разнообразие решаемых задач опирается на возможность выбора 1D, 2D или 3D постановок и наличие широкого спектра транспортных моделей: диффузионного дрейфа, термодинамики и гидродинамики. В библиотеке раздела имеются также квантовая модель туннелирования для расчета затворных утечек и модель инжекции горячих носителей.

Комплекс имеет набор различных режимов компьютерного контроля спроектированной схемы: постоянный ток, переходный процесс, переменный ток, гармонический баланс, смешанная волна (рис. 3).

Алгоритмика Sentaurus Device включает в себя надежные вычислительные методы и реализующие их программные коды. В частности, решатель МОСА (Monte-Carlo) обеспечивает интегрирование методом Монте-Карло уравнений Шредингера, что позволяет учесть, например, такой квантовый эффект, как «отодвигание» электронов от границы раздела «кремний-оксид кремния», приводящие к снижению емкости затвора и тока транзистора.

Раздел инструментария **Sentaurus Structure Editor** предназначен для редактирования спроектированных 2D и 3D структур и 3D эмуляции процессов.

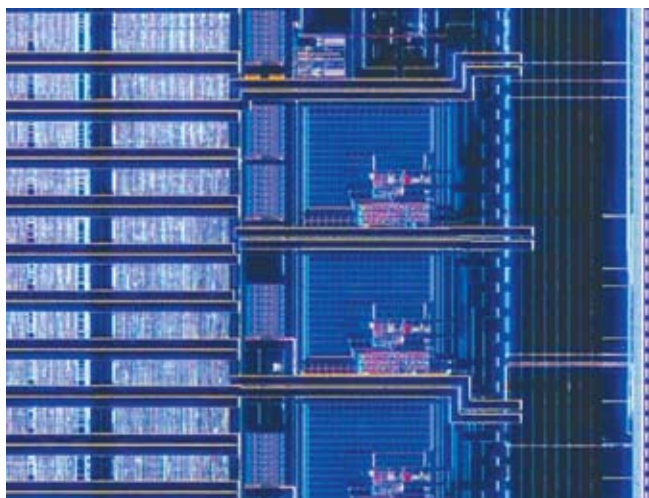


Рис. 3. Один из сегментов СБИС полупроводникового прибора. Программный инструментарий TCAD Sentaurus

В режиме эмулятора комплекс переводит шаги технологических операций, таких как травление, эпитаксия, оксидирование, фотолитография, полировка, в геометрические действия и наоборот. Например, на стенке геометрически сгенерированной щели может быть осажден тонкий слой оксида. Специальные алгоритмы позволяют, в частности, моделировать направленное травление, которое используется при изготовлении ячейки флеш-памяти, и качество этого травления (наклон боковых стенок вытравленной щели) сильно сказывается на характеристиках прибора.

Раздел инструментария **Sentaurus Workbench** осуществляет взаимосвязь нескольких приложений, последовательно запущенных пользователем. Задав набор входных параметров (так называемое дерево экспериментов DoE), например, различное время отжига пластины, или дозу ионной имплантации, на выходе можно получить различные электрофизические характеристики прибора, а также оптимизировать их.

Специально разработанный формат записи TDR предназначен для рационального накопления, чтения и записи большого количества научных данных. В раздел включено мощное графическое средство для просмотра и редактирования таких файлов. Визуализатор TecPlot TV в составе раздела позволяет строить 1D и 2D разрезы любой 3D структуры.

Раздел инструментария **Sentaurus TCAD for Manufacturing** предназначен для связи между миром моделирования процессов и отдельных компонент схем и миром проектирования схем и их верификации.

Результаты моделирования технологий и физики прибора представляются в виде набора аналитических функций, который является входным для дальнейшего схемотехнического моделирования. Быстрое упрощенное моделирование «процесс-прибор-схема» позволяет проанализировать факторы, которые могут приводить к потерям в производстве.

Раздел представляет собой новую концепцию снижения потерь, позволяющую эффективно контролировать всю линию процессов в полупроводниковом производстве и повышать выход годных изделий.

3. Инструментарий IntelliSuite

Программный комплекс IntelliSuite [13] разработан фирмой IntelliSense Software (США). Сфера приложения инструментария – проектирование МЭМС от создания моделей процессов, применяемых на некоторых стадиях промышленного производства, до разработки технологического маршрута с вариацией его сегментов различного назначения. Пакет программ имеет несколько разделов: IntelliFab, AnisE, MEMaterial, IntelliMask.

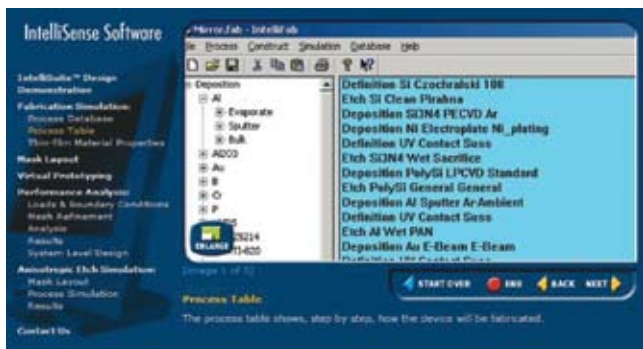


Рис. 4. Пользовательский интерфейс раздела IntelliFab программного инструментария IntelliSuite

В частности, решатель **AnisE** предназначен для моделирования анизотропного травления (**Anisotropic Etching**).

Комплекс IntelliSuite был одним из первых софт-разработок для проектирования МЭМС широкого назначения. IntelliSuite являлся пионером МЭМС-индустрии 90-х годов: первые программные продукты для МЭМС (1993), первый инструментарий САПР (1995), первые программы расчета анизотропного травления (1997), первый инструментарий MFMS (Micro Fluidic Molecular Systems) для моделирования операций с жидкостями на микроуровне, со встроенной в микроканал автономной системой управления потоком (1999).

Комплекс IntelliSuite является стандартным инструментарием разработки МЭМС широкого назначения, с дружественным и ясным пользовательским интерфейсом (рис. 4). Он может быть использован для проектирования термомеханических систем, пьезодатчиков, электромагнитных и рентгеновских преобразователей, биоМЭМС и микроканальных устройств.

Однако следует отметить, что материалы на сайте фактически не обновлялись с 2005 года.

4. Инструментарий CoventorWare

Программный инструментарий CoventorWare [14] разработан фирмой Coventor (США) и ориентирован на поддержку разработок МЭМС-структур и приборов (рис. 5) с «высоким качеством и низкими затратами проектирования, с хорошим пониманием процессов и возможностью их модификации».

Инструментарий включает в себя несколько программных комплексов, из которых интересам данной статьи соответствует комплекс MEMCAD (а также, частично, FlumeCAD). Этот комплекс, наряду с другими функциями, обеспечивает моделирования физико-химических процессов (в том числе травления, оксидирования, отжига) на основе метода конечных элементов для предсказания поведения компонентов МЭМС, включая электро-механические, электротермические и термомеханические эффекты.

Комплекс обеспечивает конструирование МЭМС, используя планировщик SEMulator3D

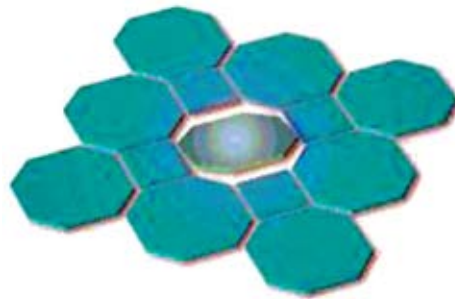


Рис. 5. Разработка и тестирование МЭМС-устройств различного назначения. Программный инструментарий CoventorWare

(**SEMiconductor simulator**), общую платформу для разработки приложений, имеющую параметризованную библиотеку сложных процессов, с дружественным пользовательским интерфейсом.

Функция «Редактор процессов» позволяет пользователю определять свой собственный план проекта и последовательность шагов (процессов) его осуществления. Специальный 3D-визуализатор позволяет пользователю анализировать получаемые результаты в интерактивном режиме и изменять план с возможностью перестановки его разделов для улучшения модели МЭМС. Планировщик SEMulator3D подразделен на сегменты FAB и LAB. Конструкторский сегмент FAB содержит подразделы «Документирование процесса», «Оптимизация планирования», «Интегрирование (сборка процессов)» с соответствующими функциями.

Исследовательский сегмент LAB содержит подразделы «Анализ неисправностей», проектировщик «CAD/NAV link», «Редактор схемы» (с возможностью движения как вперед по плану, так и возврата назад), также с многочисленными функциями. (Заметим в скобках, что, на наш взгляд, здесь комплекс уступает софт-разработкам других фирм.)

5. Инструментарий MEMS Pro Suite (MEMSCAP)

Программный комплекс MEMS Pro Suite (версия V4 [15]) создан фирмой MEMSCAP (США), которая является ведущим разработчиком технологий MUMPs (Multi-User MEMS Process, многопользовательский МЭМС-процесс) и САПР (систем автоматизированного проектирования), и производителем МЭМС широкого назначения. Отметим, что вариант этой технологии, технология поверхностной микрообработки PolyMUMPs стала стандартом и используется на 150-200 предприятиях. Ее конструкторский раздел SOIMUMPs представляет собой эффективный метод проектирования и производства МЭМС на основе КНИ-технологий.

Технология MUMPs является одной из разновидностей техпроцесса изготовления МЭМС-изделий методами и приемами поверхностной микрообработки с использованием трех слоев поликристаллического кремния. Эта технология, хотя

и имеет обычные характеристики стандартного микромашиного цикла (легирование, осаждение, травление, оксидирование, отжиг, эпитаксия, металлизация и др.), но является более эффективной, рентабельной и проверенной временем технологией. Однако она предъявляет повышенные требования к качеству предварительного компьютерного проектирования.

Все проектировщики МЭМС, которые пользуются программным комплексом Pro V4, должны придерживаться и следовать определенным правилам проектирования. Эти правила ограничивают конструкторов в разработке более сложных микроустройств, но оставляют возможность вариации различных проектов чипов в стандартизованном производственном цикле. Такая стандартизация снижает стоимость производства чипов и позволяет более широкому кругу разработчиков (даже со средней квалификацией) реализовывать свои проекты.

MUMPs-процесс (вначале компьютерное проектирование, затем практическая реализация) начинается с создания кремниевой подложки, высоко легированной фосфором. Далее на пластину осаждается слой нитрида кремния Si_3N_4 , затем – поликремния Poly0 (начальный слой). Рисунок Poly0 формируется с помощью фотолитографии (нанесение фоторезиста, экспонирование через маску-шаблон, обработка экспонированного фоторезиста и создание рисунка как нового шаблона для последующего травления с целью переноса изображения на нижележащий слой).

После травления производится отжиг пластины и получение слоя FO (First Oxide) первого оксида. На FO-слой с применением специальных фотошаблонов наносится рисунок, по которому на этот слой осаждается новый слой поликремния Poly1, с его последующим травлением, отжигом и оксидированием для получения слоя второго оксида SO (Second Oxide).

На SO-слой с помощью новых фотошаблонов наносятся рисунки, которые используются как защитные маски для травления во втором оксиде окон к слою Poly1. Затем осаждается второй слой поликремния Poly2.

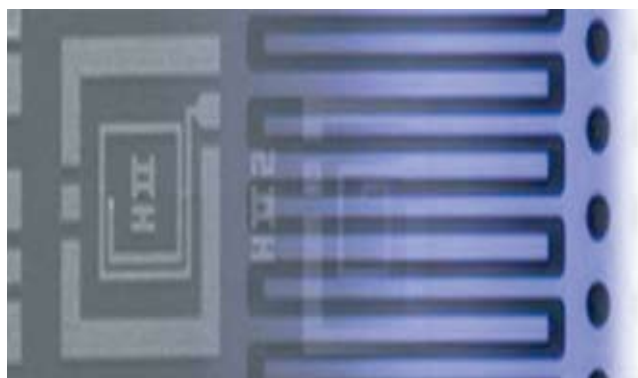


Рис. 6. Структурные слои полупроводникового материала (элементы технологии MUMPs). Программный инструментальный MEMS Pro Suite

Слои Poly0, Poly1 и Poly2 являются механическими структурными слоями полупроводникового материала (рис. 6), и их гетероструктуры (элементы БИС и СБИС) получены травлением первого и второго оксидов.

Далее проводятся завершающие стадии MUMPs-процесса (металлизация, организация электросвязи между слоями, шлифовка поверхности и т.д.; анализ этих стадий лежит вне рамок данной работы).

Описание MUMPs-технологии проведено специально достаточно подробно (хотя и с некоторым оттенком конспективности) для того, чтобы подчеркнуть доминирующую роль процессов травления и оксидирования в технологическом цикле промышленного производства МЭМС-устройств, которые опираются на эту технологию. Соответственно важна роль компьютерного моделирования этих процессов, с возможностью для конструкторов проводить многовариантные расчеты с высокой точностью за приемлемое время.

Это выдвигает повышенные требования к качеству вычислительного инструментария, моделирующего физико-химические процессы в полупроводниках.

Предлагаемый фирмой компьютерный комплекс MEMS Pro V4 (4-я версия) содержит 6 программных сегментов САПР различного назначения: Xplorer (среда UNIX), Pro (среда Windows), Master, MEMS Modeler, SYMBA, MUMPSstart. Комплекс предоставляет большие возможности компьютерного моделирования различных физико-химических процессов, в частности, применяющихся для формирования тонких пленок SiO_2 , Si_3N_4 , polySi, которые используются в КНИ-технологиях.

Расчет оксидирования кремния для получения слоя диоксида кремния обеспечивается решателем, в котором используется вычислительный алгоритм на основе частично модернизированного классического метода Дила-Гроува [8].

Специализированные решатели проводят 3D-расчеты изотропного и анизотропного травления слоев различных материалов и их отжига.

6. Инструментарий Tsuprem-4

Программный комплекс Tsuprem-4 разработан фирмой Avant! Corporation (США) и предназначен для проектирования элементарных МЭМС, широко применяемых в полупроводниковой индустрии.

Основным направлением комплекса является моделирование физических, химических, термических и механических процессов, использующихся в производстве кремниевых полупроводниковых приборов. Наиболее применяемыми и, одновременно, наиболее сложными для компьютерных расчетов представляются: ионная имплантация легирующих примесей в кремниевую подложку, травление пластины для формирования нужного микрорельефа поверхности, оксидирование крем-

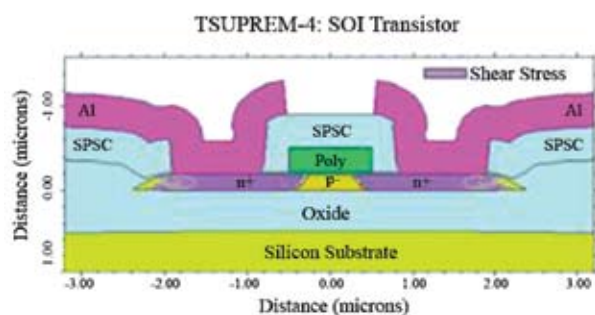


Рис. 7. Разработка КНИ-транзистора: пластина кремния после процессов травления, оксидирования и отжига. Программный инструментарий TSUPREM-4

ния для получения тонких или толстых оксидных слоев, эпитаксия различных материалов с наращиванием пленок нужной толщины, низкотемпературный депозит, отжиг составной пластины для снятия внутренних механических напряжений, диффузия примесей в кремнии, их сегрегация (выталкивание или втягивание, в зависимости от типа примеси) на фронте волны оксидирования.

Комплекс содержит специализированные программы (решатели) для моделирования цикла этих процессов (рис. 7) с последовательностью шагов, определяемых проектировочным планом пользователя.

Инструментарий предоставляет пользователю средства визуализации полученной цифровой информации с широким спектром возможностей: 1D, 2D и 3D изображения, различные разрезы, сечения, выборки и т.п.

В настоящее время программный комплекс TSUPREM-4 интегрирован в инструментарий TCAD Sentaurus [12].

7. Инструментарий MicroTec

Программный комплекс MicroTec [17] разработан фирмой Siborg Electronics (Канада) и ориентирован в основном на компьютерную поддержку моделирования электрофизических, электрохимических и термомеханических процессов, используемых в технологиях КМОП и КНИ промышленного производства МЭМС. Главными объектами комплекса являются процессы имплантации легирующих примесей донорного и акцепторного типов в базовый материал, эпитаксия различных материалов для создания поверхностных пленок (слоев) с вариацией их толщины, травление материала с целью получения нужного микрорельефа поверхности, оксидирование кремниевой пластины для создания пленок оксида требуемой конфигурации и толщины, диффузия примесей в структурных слоях и процесс их сегрегации на фронте волны оксидирования и образование зон повышенной концентрации примесей и, соответственно, областей повышенной проводимости р- и n-типа, необходимых для организации электрических каналов и, далее, создание элементов БИС, СБИС и УБИС

(резисторов, конденсаторов, транзисторов, схем памяти и т.п.).

Комплекс содержит ряд вычислительных разделов, выполняющих различные функции как исследования процессов, так и проектирования МЭМС.

В частности, решатель SibLin обеспечивает интегрирование 2D и 3D систем дифференциальных уравнений в частных производных, таких как уравнение Пуассона, нестационарные уравнения Лепласа для теплопереноса и диффузии с переменными коэффициентами, зависящими от температуры и концентрации. Вычислительные алгоритмы решателя, основанные на известном методе Ван-дер-Ворста, обеспечивают эффективное интегрирование систем уравнений как с симметричной, так и несимметричной матрицей.

Одним из разделов комплекса является решатель ETCH (Etching), который обеспечивает расчет процесса травления материалов различных типов (пластин моно- и поликристаллического кремния Si, пленки оксида SiO_2 , защитных нитридных масок Si_3N_4 и др.) для получения разнообразных видов профилей микрорельефа поверхности. Возможно, по заказу пользователя, применение различных моделей (технологий) травления: «сухое фрезерование» (ионное, ионно-плазменное, электронно-лучевое и др.) или «мокрое вытравливание» (газофазное или жидкостное, с вариацией типа химического травителя).

Очень важным разделом комплекса является решатель LOCOS (Local Oxidation of Silicon), ориентированный на решение задач оксидирования поверхности, некоторые участки которой закрыты защитными масками, в постановках для технологий КМОП и КНИ. По заказу пользователя возможна вариация оксидантов («сухой» кислород O_2 , кислород O_2 и/или пары воды H_2O и др.), с вариацией параметров процесса – температуры и давления.

Инструкции к решателям написаны исключительно ясным языком и содержат как краткое изложение физических принципов, на которых основан алгоритм решателя (аналогичный современным алгоритмам, используемым в [9, 10]), так и практические сведения, необходимые пользователю (смысл управляющих параметров, диапазоны их допустимой вариации, конкретные значения параметров режима «по умолчанию»).

Указаны даже стандартные затраты на проведение «среднего» расчета: требуемый ресурс памяти (около 8 Мб для сетки в 1000 узлов), время выполнения задания (около минуты). Хотя такая информация быстро устаревает в связи с прогрессом вычислительной техники, подобный подход к пользователю достаточно приятен.

Исходные коды представлены в версиях для различных компиляторов (C, C++, Fortran, Pascal), что делает возможным их использование в процессах обучения студентов и аспирантов, например,

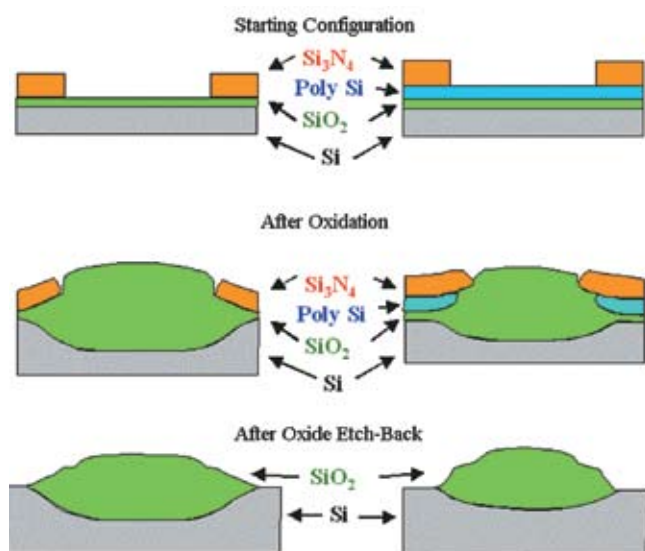


Рис. 8. Моделирование процессов травления и оксидирования кремния. Разделы ETCH и LOCOS программного инструментария MicroTec

для иллюстрации влияния вариации алгоритма (или его элементов) на получаемое решение.

Представленная на сайте демо-версия (рис. 8) наглядна, информативна и характеризуется дружелюбным пользовательским интерфейсом.

8. Заключение

Современные КМОП и КНИ технологии, с их возможностью увеличения производительности полупроводниковых приборов с одновременным снижением потребляемой мощности, являются доминирующими для изготовления БИС, СБИС и УБИС. Происходит непрерывное уменьшение размеров интегральных схем, а это, в свою очередь, определяет процесс миниатюризации МЭМС-устройств и их элементов. Так, в 1997 году минимальный технологический размер транзистора составлял около 250 нм, а толщина его подзатворного диэлектрика – около 5 нм. В 2006 году размер транзистора уменьшился до 100 нм, а толщина его подзатворного диэлектрика – до 2 нм. К 2012 году прогнозируется дальнейшее уменьшение размера транзистора до 50 нм, а толщина его подзатворного диэлектрика станет меньше 1 нм, с приближением к квантовомеханическому пределу (подробнее см. [18]).

В свою очередь, миниатюризация элементов МЭМС приводит к существенному уменьшению размеров УБИС, делая возможным проектирование, производство и эффективное практическое применение совершенно новых нанoeлектронных приборов (см. [19, 20]).

Компьютерное моделирование электрофизических, термохимических и механических процессов является важным средством развития как самих нанотехнологий, так и nanoиндустрии в целом.

Роль компьютерного моделирования будет непрерывно повышаться с расширением применения

суперЭВМ и современных высокопроизводительных вычислений параллельного счета.

В заключение авторы считают приятным долгом выразить благодарность проф. С.Н. Коробейникову за полезные обсуждения работы и проф. Г.С. Хакимзянову за ценные дискуссии в области современных нанотехнологий. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06–08–00384).

Литература

1. All about MEMS. Интернет-сайт <http://allaboutmems.com/>
2. Яшин К.Д., Осипович В.С., Божко Т.Г. Разработка МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2008. №1. С.28–34.
3. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников. 1998. Т.32, №1. С.3–18.
4. Асеев А.Л. Наноматериалы и нанотехнологии для современной полупроводниковой электроники // Российские нанотехнологии. 2006. №1. С.97–110.
5. Асеев А.Л., Попов В.П., Володин В.П., Марютин В.Н. Перспективы применения структур «кремний-на-изоляторе» в микро-, нанoeлектронике и микросистемной технике // Микросистемная техника. 2002. №9. С.3–17.
6. Адамов Д.Ю., Матвеев О.С. Усовершенствование структур МОП-транзисторов в нанометровых технологиях // Нано- и микросистемная техника. 2008. №2. С.53–63.
7. Пахомов С.А. Производство микропроцессоров Intel // Компьютер Пресс. 2002. №4. С.33–35.
8. Deal B.E., Grove A.S. General relationship for the thermal oxidation of silicon // Appl. Phys. 1965. V.36. P.37–70.
9. Тарнавский Г.А., Алиев А.В., Тарнавский А.Г. Создание специальных наноструктур донорных и акцепторных примесей в базовой подложке кремния для конструирования новых полупроводниковых материалов // Нано- и микросистемная техника. 2007. №9. С.2–7.
10. Тарнавский Г.А., Анищик В.С., Тарнавский А.Г. Влияние защитных масок при отжиге кремниевой пластины на формирование наноразмерных гетероструктур легирующих примесей фосфора // Нано- и микросистемная техника. 2008. №3. С.58–65.
11. Тягунов О.А. Программный комплекс для моделирования и исследования динамических характеристик микро- и наномеханических элементов и систем // Нано- и микросистемная техника. 2008. №3. С.19–25.
12. Sentaurus. Приборно-технологическое моделирование. Система автоматического проектирования ISE TCAD Sentaurus // Интернет-сайт <http://www.synopsys.com/products/tcad.html> (рус.: <http://www.isen.ru/ise/prod.html>).
13. IntelliSuite: Industry leading MEMS design tools. Интернет-сайт <http://www.intellisuite.com/>
14. CoventorWare: The leader in 3D MEMS & semiconductor software. Интернет-сайты <http://www.coventor.com/> и <http://www.cmf.rl.ac.uk/cad/memcad.html>

15. MEMS Pro Suite (MEMSCAP): The power of a small world. Интернет-сайт <http://www.memscap.com/>
16. Tsuprem-4: Semiconductor process simulation software. Интернет-сайт http://www.synopsys.com/products/tcad/taurus_tsuprem4_ds.html
17. MicroTec: Software Package for Two-Dimensional Process and Device Simulation. Интернет-сайт <http://www.siborg.ca/>
18. Мустафаев Ар.Г., Мустафаев Аб.Г. Проблемы масштабирования затворного диэлектрика для МОП-технологий // Нано- и микросистемная техника. 2008. №4. С.17–22.
19. Телец В., Алфимов С., Иванов А., Митин Ю., Борисов А., Истомин Е. Прикладные аспекты нанотехнологий // Наноиндустрия. 2007. №4. С.4–11.
20. Ковальчук М.В. Нанотехнологии – фундамент новой наукоемкой экономики 21 века // Российские нанотехнологии. 2007. №1–2. С.6–11.