

А. А. ГЛУШКО, И. А. РОДИОНОВ, к. т. н. В. В. МАКАРЧУК

Россия, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана  
E-mail: vlasov@iu4.bmstu.ru

Дата поступления в редакцию  
01.03 2007 г.

Оппонент д. т. н. В. В. БАРАНОВ  
(БГУИР, г. Минск)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СУБМИКРОННЫХ КМОП СБИС С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ TCAD

*Рассмотрены особенности технологических процессов изготовления субмикронных КМОП СБИС и их моделирования. Особое внимание уделено моделированию примесного профиля.*

Математическое моделирование играет все большую роль в микроэлектронике, в частности, при изготовлении субмикронных СБИС, в противовес экспериментальному подходу к оптимизации конструкции элементов СБИС методом проб и ошибок. Моделирование технологических процессов существенно уменьшает затраты на экспериментальные работы. Однако при математическом моделировании субмикронных СБИС следует учитывать особенности их изготовления [1, 2]. Элементы СБИС имеют субмикронные характерные размеры порядка 0,5—0,35 мкм, а толщины слоев и глубины переходов составляют около 0,1 мкм.

Маршрут изготовления субмикронных СБИС должен удовлетворять следующим четырем основным требованиям.

Первое. Процессы должны проводиться при температурах, позволяющих свести к минимуму диффузию легирующих примесей в горизонтальном и вертикальном направлениях. Этого можно добиться, используя обработку при высоких температурах очень кратковременно, т. е. проводя быстрый термический или фотонный отжиг.

Второе важное требование — это малые сопротивления. Паразитные сопротивления и емкости могут приводить к существенному снижению быстродействия СБИС. Сопротивление дорожек и контактов с субмикронными размерами может быть уменьшено путем селективного выращивания и осаждения тугоплавких металлов на поликремниевые затворы, а также на истоки и стоки с последующим их силицидированием. Использование силицидов таких тугоплавких металлов как платина, титан и вольфрам позволяет существенным образом снизить вышеуказанные сопротивления.

Третье требование при изготовлении структур с субмикронными размерами — это плоскостность поверхности или планарность, необходимая в основном по трем причинам. Во-первых, для того, чтобы при оптическом экспонировании топологический рисунок был воспроизведен точно (наличие ступенек

существенно затрудняет выполнение этой задачи). Во-вторых, изменения топографии усложняют и без того очень трудную задачу фокусирования экспонирующего устройства (степпера), сокращают глубину фокуса, следовательно, уменьшают ширину процессного окна, а значит, ведут к нестабильности технологического процесса и зачастую к невозможности выполнения требований по надежности и проектным нормам. В-третьих, планарность необходима для обеспечения хорошего перекрытия ступенек в местах перехода от межсоединений к контактам.

И, наконец, четвертое. Для СБИС с размерами структур так называемого «глубокого субмикрона» (250 нм и менее) не представляется возможным разделять технологию производства СБИС и их проектирование [3, 4]. Для таких структур важно учитывать существенное отклонение геометрической формы полученной маски от ее изображения на фотошаблоне. Это отклонение вызывает волновые явления, если длина волны излучения, используемого степпером, сравнима с геометрическими размерами получаемой структуры.

Топологию СБИС изменяют путем введения сложных источников освещения, введения фигур коррекции эффектов близости, учета получаемого рельефа поверхности кристалла, эффекта больших полей, подготовки к последующим процессам фотолитографии и травления и, наконец, учета различных технологических "уходов" [5].

Все описанные корректировки топологии невозможно ввести эмпирическим путем, для этого потребовалось бы слишком много времени. Поэтому и используются все более мощные средства моделирования технологического процесса производства СБИС, к которым относятся системы TCAD.

Необходимо отметить, что в настоящее время существует несколько мощных систем TCAD таких, например, фирм как TMA Inc. (США), ISE Integrated Systems Engineering AG (Швейцария), Synopsys Inc. и Silvaco International (США). Эти системы TCAD обеспечивают возможность сквозного моделирования технологического процесса изготовления СБИС. Стоимость подобных программных средств исчисляется сотнями тысяч долларов за лицензию, не говоря уже о стоимости подготовки специалистов, способных грамотно их использовать. В настоящей статье речь пойдет о моделях, используемых в таких системах технологического моделирования.

На **рис. 1** представлен типичный технологический маршрут изготовления КМОП СБИС.

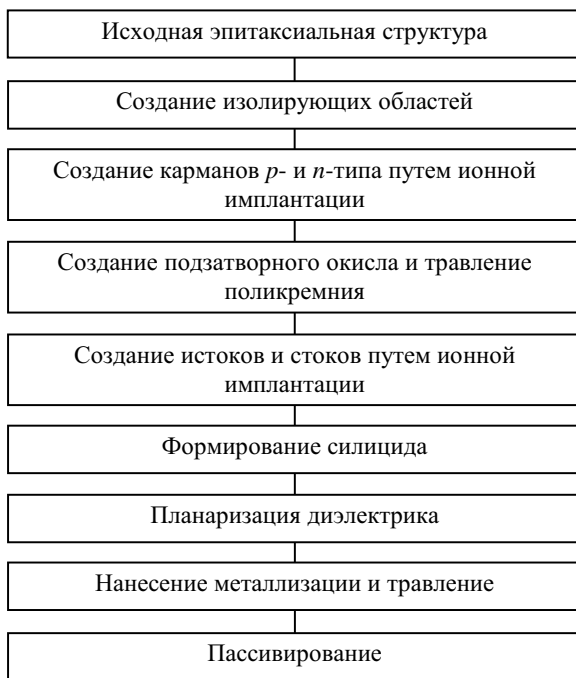


Рис. 1. Технологический маршрут изготовления КМОП-структур

Поперечное сечение реализуемой КМОП-структуры показано на **рис. 2**.

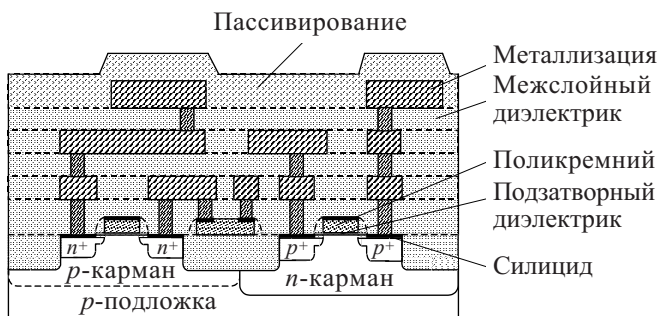


Рис. 2. Поперечное сечение КМОП-структуры

При разработке технологического маршрута формирования субмикронных КМОП СБИС и его моделировании в системах TCAD основной целью является получение заданного примесного профиля, который, в свою очередь, является основой для моделирования электрических характеристик. Из приведенных на рис. 1 технологических операций основную роль в формировании примесного профиля играют процессы ионной имплантации и последующего отжига.

Имплантация обеспечивает чрезвычайно однородные и воспроизводимые профили концентрации, задаваемые посредством управления током ионов во время процесса. Кроме того, оксидные слои, используемые в качестве масок при диффузии, можно применять и для маскирования по отношению к ионному пучку. Ионная имплантация является низкотемпературным процессом, однако для рекристаллизации поврежденных решетки и активирования примесей (пе-

ремещения атомов примеси из междоузлий в узлы решетки) требуется последующий отжиг.

Для расчета имплантационного примесного профиля в системе TCAD применяются аналитические методы, в основе которых лежат функции распределения Гаусса или Пирсона. В этих методах допускается, что каждый пучок имплантированных ионов вызывает перераспределение ионов в пластине в соответствии с вероятностными распределениями Гаусса и Пирсона. Для получения плотности распределения ионов от всего пучка применяют принцип суперпозиции.

Кроме того, для моделирования распределения имплантированных ионов и имплантационных дефектов применяется метод Монте-Карло. С помощью этого метода моделируются физические события, происходящие при торможении отдельных частиц. Ионы тормозятся при ядерных столкновениях и в результате электронного трения. Ядерные столкновения описываются формулой Линдхарда. Местоположение рассеивающих атомов мишени считается случайным.

Преимущество метода Монте-Карло заключается в присущем ему прямом соответствии реальным физическим событиям, а основной недостаток — в чрезмерных затратах машинного времени, необходимого для получения статистически надежных результатов.

Как отмечалось выше, после ионной имплантации необходимо проводить отжиг. Модель отжига в системах TCAD довольно сложна и учитывает как диффузионные процессы, так и процессы химических превращений на поверхности пластины. Если отжиг проводится за короткий промежуток времени, измеряемый секундами, то изменение концентрационного профиля в результате диффузии незначительно. Если же отжиг проводится длительное время, происходит значительное перераспределение примеси.

В основе моделирования диффузионного примесного профиля лежит диффузионное уравнение. Поскольку в ряде случаев это уравнение нелинейно (к примеру, если диффузия происходит при высокой концентрации имплантированной примеси), то необходимо пользоваться численными методами решения дифференциальных уравнений.

Процессы осаждения и травления можно рассматривать как вспомогательные для проведения селективной диффузии и имплантации. Точность проведения этих процессов влияет на качество полученной топологии кристалла, что становится особенно важным при проектировании субмикронных структур.

Осаждение и травление в первом приближении можно рассматривать как процессы, контролируемые скоростью поверхностной реакции. Каждая точка поверхности рассматривается как бесконечно малый источник Гюйгенса, а передвигающийся контур при этом представляет собой геометрическое место точек касания со всеми сферами влияния этих источников. Для выполнения точных и эффективных расчетов в алгоритмах необходимо учитывать особенности моделируемых процессов и соответствующие граничные условия.

И наконец, разработчику технологического процесса важно знать, как организована система моде-



Рис. 3. Структура систем TCAD

лирования. Как видно из рис. 3, все программные компоненты систем TCAD можно условно разбить на три группы. Первая группа программ предназначена для подготовки входных файлов. Данные о технологическом процессе изготовления СБИС, о топологии проектируемой СБИС переводятся ими в программные коды. Вторая группа программ — собственно программы моделирования. Они, как правило, не имеют развитого графического интерфейса, но с их

помощью проводятся расчеты, результаты которых сохраняются в выходных файлах моделирования. Просмотреть результаты моделирования можно с помощью третьей группы программ — программ визуального отображения результатов моделирования.

На входе систем TCAD задаются параметры технологического процесса (последовательность выполнения операций и список необходимых данных для их выполнения), а также топология. На выходе получают профили распределения примесей в кремниевой пластине, которые, в свою очередь, являются исходными данными для последующего моделирования электрических характеристик.

С помощью систем TCAD становится возможным не только проектировать технологический процесс, но и отслеживать его, а также прогнозировать влияние отдельных параметров технологического процесса на качество получаемых СБИС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. МОП СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема.— М.: Радио и связь, 1988.
2. Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. Электроника ультрабольших интегральных схем.— М.: Мир, 1991.
3. Veendrick Ir. H. J. M. Deep-submicron CMOS ICs.— New York: Kluwer academic publishers, 2000.
4. Kennel H. W., Cea S. M., Lilak A. D. et al. Modeling of ultrahighly doped shallow junctions for aggressively scaled CMOS // International Electron Devices Meeting.— San Francisco, CA.— 2002.— P. 875—878.
5. Sixt P. Optical proximity correction (OPC) // Technology Review.— 2003.— Vol. 1, issue 7.— P. 1—8.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



**Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы / А. М. Кудрявцев, И. Г. Мальтер, А. Е. Львов, О. П. Павловский, В. А. Шумилов, А. М. Щитов.— М.: Радиотехника, 2006.— 208 с.**

Изложены результаты разработок узлов, используемых при создании радиоизмерительной аппаратуры СВЧ- и КВЧ-диапазонов, рассмотрены общие вопросы ее создания и нормативная база; приведены теоретические основы создания и особенности конструктивного исполнения автогенераторов с электромагнитной и электрической перестройкой частоты, коаксиальных и волноводных направленных ответвителей, стробоскопических преобразователей, умножителей частоты, устройств на поверхностно-акустических волнах, термоэлектрических преобразователей и ряда других типов устройств; представлены методы измерения параметров, характеризующих работу устройств, их применение в радиоизмерительной технике и перспективы развития.

Для специалистов, занимающихся разработкой радиоизмерительной аппаратуры СВЧ- и КВЧ-диапазонов. Может быть полезна аспирантам и студентам старших курсов радиотехнических факультетов.



**Бойм К. Цифровая электроника.— М.: Техносфера, 2007.— 472 с.**

В книге шаг за шагом раскрывается мир цифровой электроники, ее взаимосвязь с другими областями техники. При создании учебника автор использовал свой большой опыт преподавательской деятельности. Материал изложен последовательно и понятно, начиная с основ. Контрольные тесты с вопросами и задачами в конце каждой главы позволяют проверить понимание пройденного материала; в конце учебника приведены решения.

Книга предназначена для студентов электротехнических и машиностроительных специальностей, инженеров-практиков, техников, а также всех, кто интересуется современной цифровой техникой.