

ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СУБМИКРОННЫХ КМОП СБИС С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ TCAD

Глушко А.А., Родионов И.А., к. т. н., доцент Макаrchук В.В.
Кафедра ИУ4 МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

ABILITIES OF TECHNOLOGICAL PROCESSES MODELLING OF SUBMICRON CMOS VLSI PRODUCING WITH THE MODERN TCAD SYSTEMS

Glushko A.A., Rodionov I.A., Candidate of technical science, reader Makarchuk V.V.
BMSTU, Moscow, Russian Federation

Аннотация

Настоящая работа посвящена анализу особенностям технологических процессов изготовления субмикронных КМОП СБИС и их моделирования. Особое внимание уделено моделированию примесного профиля.

Abstract

This work is devoted to the features analysis of submicron CMOS VLSI producing technological processes and their simulation. The main attention is concentrated to the modeling of doping profile.

Математическое моделирование играет все большую роль в микроэлектронике, в частности, при изготовлении субмикронных СБИС. При этом практически неприемлемым становится экспериментальный подход, в котором оптимизация конструкции элементов СБИС производится методом проб и ошибок. Такое моделирование технологических процессов дает в настоящее время непосредственный экономический эффект, существенно уменьшая затраты на экспериментальные работы. Однако с проблемой математического моделирования тесно связаны особенности изготовления субмикронных СБИС [1, 2].

Элементы СБИС обладают субмикронными характерными размерами порядка 0,5 – 0,35 мкм, а толщины слоев и глубины переходов в них составляют порядка 0,1 мкм. Маршрут изготовления субмикронных СБИС должен удовлетворять четырем основным требованиям.

Во-первых, процессы изготовления СБИС должны проводиться при достаточно низких температурах, что позволяет свести к минимуму диффузию легирующих примесей в горизонтальном и вертикальном направлениях. Аналогичный эффект также можно получить, используя очень кратковременную обработку пластин при высоких температурах, проводя быстрый термический или фотонный отжиг.

Второе важное требование состоит в обеспечении малых сопротивлений проводящих дорожек и контактов. 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 пленок тугоплавких металлов на поликремниевые затворы, а также на истоки и стоки полевых транзисторов с последующим силицидированием контактов к указанным областям. Использование силицидов таких тугоплавких металлов, как платина, титан и вольфрам, позволяет существенным образом снизить вышеуказанные сопротивления.

Третьим требованием, критичным для изготовления структур с субмикронными размерами, является обеспечение планарности (плоскостности) поверхности обрабатываемой пластины. Планарность необходима, в основном, по трем причинам. Во-первых, фоторезист должен быть планарным для того, чтобы при оптическом экспонировании топологический рисунок был воспроизведен точно. Наличие ступенек рельефа существенно затрудняет выполнение этого требования. 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. Планарность критична и с точки зрения обеспечения хорошего перекрытия ступенек в местах перехода от межсоединений к контактам.

И, наконец, четвертым требованием, необходимым для производства СБИС с субмикронными размерами структур, является использование технологии так называемого «глубокого субмикрона» (то есть длины волны экспонирующего излучения степпера 250 нм и менее). При этом уже не представляется возможным отделить технологию производства СБИС от их проектирования, так как важно учитывать существенное отклонение геометрической формы полученной маски от ее изображения на фотошаблоне [3, 4]. Это отклонение связано с волновыми явлениями, происходящими при длине волны экспонирующего излучения, которая сравнима с геометрическими размерами получаемой структуры.

Топологию СБИС изменяют с учетом 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, иначе для этого потребовалось слишком много времени. Поэтому необходимо использовать все более мощные средства моделирования технологического процесса производства СБИС. Необходимо отметить, что в настоящее время существует несколько мощных систем TCAD таких фирм, например, как TMA Inc. (США), ISE Integrated Systems Engineering AG (Швейцария), Synopsys Inc. (США) и Silvaco International (США). Эти системы TCAD обеспечивают возможность сквозного моделирования технологического процесса производства 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.

При разработке технологического маршрута формирования субмикронных КМОП СБИС и его моделировании в системах TCAD основной целью является получения заданного

примесного профиля, который, в свою очередь, является основой для моделирования электрических характеристик.

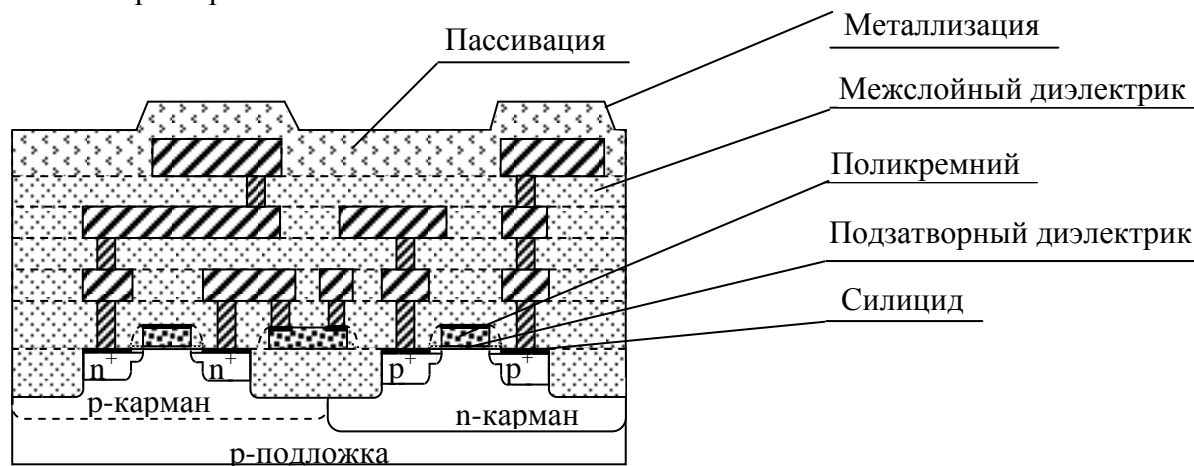


Рис. 2. Поперечный разрез КМОП-структуры

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

Для расчета имплантационного примесного профиля в системе TCAD применяются аналитические методы расчета, 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. Местоположения рассеивающих атомов мишени считаются случайными.

Преимущество метода Монте-Карло заключается в присутствии ему прямом соответствии реальным физическим событиям, а основной недостаток – в чрезмерных затратах машинного времени, необходимых 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 моделирования. В соответствии с рисунком 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.

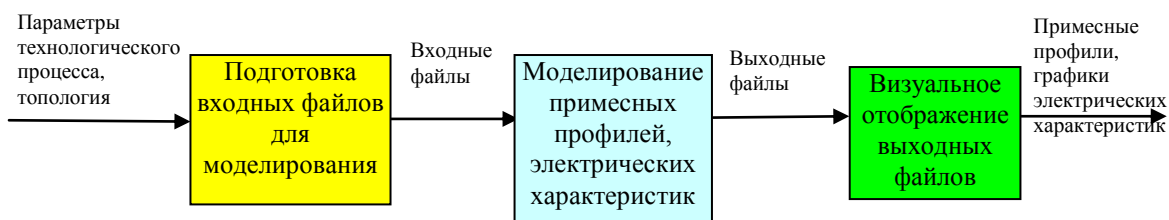


Рис. 3. Структура систем TCAD

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 сформированных структурах, которые, в свою очередь, являются исходными данными для последующего моделирования их электрических характеристик. С помощью систем TCAD становится возможным не только проектировать технологический процесс, но также контролировать его, а также прогнозировать влияние отдельных параметров технологического процесса на качество получаемых СБИС.

Литература

1. МОП СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов/Под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема: Пер. с англ.– М.: Радио и связь, 1988.– 496 с.:ил.
2. Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. Электроника ультрабольших интегральных схем: Пер. с англ.– М.: Мир, 1991.– 327 с.: ил.
3. Ir. H.J.M. Veendrick. Deep-Submicron CMOS ICs, Second Edition, 2000, Kluwer academic publishers, 526 pp.
4. H.W. Kennel, S.M. Cea, A.D. Lilak, P.H. Keys, M.D. Giles, J. Hwang, J.S. Sandford, S.Corcoran. Modeling of ultrahighly doped shallow junctions for aggressively scaled CMOS, Electron Devices Meeting, 2002. IEDM '02.Digest. International, pp. 875-878
5. P. Sixt. Optical Proximity Correction (OPC). Technology Review, Volume 1, Issue 7, April 2003, pp. 1-8.