Аннотация тематического блока

А.С. Сигов

Достижения современного информационного мира основаны, прежде всего, на прогрессе в области технологий микро- и наноэлектроники, технологий кремниевых интегральных схем (ИС). На первом этапе производства ИС формируются активные элементы схемы – МДП-транзисторы. Их изготовление на кремниевой пластине обеспечивается технологическими операциями транзисторного цикла – FEOL. В последнее десятилетие в мире достигнут большой прогресс в области FEOL-технологий, которые используют новые материалы, процессы и конструкции (high-*k* диэлектрики, металлические затворы, стресс-инжиниринг кремния, непланарная архитектура элементов и пр.), что позволило значительно повысить энергоэффективность, быстродействие и плотность транзисторов на чипе. Однако превращение набора изолированных транзисторов в финальные электрические микросхемы процессоров, памяти, систем на кристалле (SoC) может быть реализовано только при создании сложной системы межсоединений между ними путем формирования на «верхних этажах» чипа многоуровневой системы металлизации – микро- и наноразмерных проводников, погруженных в многослойные диэлектрики. За это отвечают технологии уровня BEOL, где материалы и технологические процессы более консервативны. Начиная с проектных норм 180 нм и до недавнего времени базовой системой в металлизации были медные (ранее алюминиевые) микропроводники, окруженные тонким диффузионным барьером, интегрированные в диэлектрические слои SiO_2.

Современный полупроводниковый чип содержит более миллиарда транзисторов, которые объединяются в схему десятками километров проводников, расположенных на 10–17 уровнях. Масштабирование ИС к критическим размерам 28–10–7 нм ведет к росту *RC* задержек передачи сигнала в системе межсоединений (*R* – сопротивление проводников, *C* – электрическая емкость, определяемая плотностью линий проводников, разделенных диэлектриком), тепловыделения (пропорционально *R*), возникновению перекрестных импульсных помех и пр. Несмотря на то, что уменьшение размеров транзисторов увеличивает их быстродействие, задержки в системе металлизации и тепловые потери являются главными препятствием на пути повышения производительности ИС высокой степени интеграции.

Этот вызов потребовал от индустрии в конце прошлого столетия совершить достаточно сложный технологический переход от комбинации материалов: Al в качестве проводника и SiO_2 в качестве изолирующего диэлектрика – к Cu-проводникам с лучшей электропроводностью и постоянному поиску материалов с более низкой диэлектрической проницаемостью (так называемые low-*k*-диэлектрики, величина диэлектрической проницаемости *k* которых меньше, чем у SiO_2, то есть $k<3.9$). Однако дальнейший скейлинг требует решения сложных материаловедческих задач: планомерного снижения величины диэлектрической проницаемости low-*k* материалов, обеспечения малого сопротивления и стойкости к электромиграции металлических проводников, решения проблемы уменьшения толщины барьерных слоев, поиска новых эффективных методов интеграции новых материалов и технологий в существующие маршруты изготовления ИС.

Проблема снижения величины диэлектрической проницаемости изолирующего диэлектрика явилась для индустрии чрезвычайно сложной задачей. Пористые low-*k* материалы имеют низкую механическую прочность и плохую адгезию к диэлектрическим и проводящим барьерным слоям. Ионы меди легко диффундируют в пористые диэлектрики, для предотвращения чего необходимо разработать и применять специальные барьеры для диффузии. Кроме того, пористые low-*k* материалы не выдерживают обычных видов обработки, в частности, они деградируют при плазменной и химической обработке. Сложность материаловедческой задачи состоит в том, что изолирующий диэлектрик для систем металлизации должен обладать целым рядом противоречивых свойств:

— низким значением диэлектрической проницаемости ($k\leq2.5$);
— высокой электрической прочностью;
— хорошими механическими свойствами для совместимости с последующими технологическими циклами (модуль Юнга должен составлять более 6 ГПа);

— малым размером пор (менее 1.5 нм);
— гидрофобностью для предотвращения деградации вследствие сорбции воды.

Эти проблемы вынуждают разработчиков искать новые материалы и технологические процессы, обеспечивающие большую степень контроля их свойств. Среди перспективных материалов рассматриваются: периодические мезопористые силикаты, формируемые методами молекулярной самосборки, цеолиты, металло- и ковалентные органические пористые структуры.

Уменьшение критических размеров/сечения металлических проводников приводит к нелинейному увеличению их сопротивления. На первых уровнях металлизации, имеющих максимальную плотность самых тонких нанопроводников, на их проводимость начинает влиять также параметр свободного пробега электронов в металле. При этом важным вопросом становится снижение толщины барьерных слоев, обеспечивающих защиту от диффузии металла в диэлектрик, так как традиционный материал барьерного слоя (металлический или диэлектрический) имеет худшую проводимость, чем медное ядро, плохо масштабируется и напрямую влияет на емкость системы. Таким образом, необходимы материалы проводников, нанопровода из которых имеют меньшее электросопротивление, чем медь, и не требуют (в идеальном случае) диффузионных барьеров.

Уменьшение размеров приводит к увеличению сопротивления металлических проводников. При этом важным вопросом становится необходимая толщина барьерных слоев, обеспечивающих защиту от взаимодиффузии, так как барьерный слой (металлический или диэлектрический) напрямую влияет на емкость системы. Неожиданно, но в качестве новых перспективных материалов проводников рассматриваются Co, Ru, W и прочие материалы, которые, хотя и имеют более высокое удельное сопротивление, чем Cu, но при уменьшении размеров демонстрируют более низкое сопротивление из-за структуры поликристаллических зерен. Co обладает также существенно более высоким сопротивлением к электромиграции по сравнению с Cu, а Ru может травиться плазмой, что открывает перспективы его использования для альтернативных схем интеграции. В более отдаленном будущем возможно использование углеродных проводников (нанотрубки, графен), а также проводников с collective excitation (топологические изоляторы).

Предлагаемый вниманию читателя выпуск журнала «Вестник РФФИ» посвящен результатам реализации проектов ученых – победителей конкурса Российского фонда фундаментальных исследований на лучшие научные проекты междисциплинарных фундаментальных исследований по теме «Фундаментальные проблемы многоуровневых систем металлизации ультрабольших интегральных схем». Этот конкурс явился первым российским опытом, направленным на создание перспективных систем многоуровневой металлизации – критически важного процесса производства изделий микроэлектроники. Были проведены исследования по следующим направлениям:

— фундаментальные проблемы повышения степени интеграции и быстродействия УБИС;
— новые методы формирования low-*k*-диэлектриков для использования в технологиях многоуровневой металлизации интегральных схем;
— методы контроля пористой структуры, электрических и механических свойств пористых low-*k*-диэлектриков;
— новые металлы проводников с низким удельным сопротивлением, высокой стойкостью к электромиграции и высокоэффективные барьерные слои для новых поколений систем металлизации интегральных схем;
— новые технологические схемы изготовления многоуровневых систем металлизации с минимальными временами задержки для суб-7-нм технологий микроэлектроники;
— новые методы плазмохимического травления в технологии формирования многоуровневых систем металлизации интегральных схем. Процессы селективной поверхностной модификации пористых low-*k* пленок для процессов атомно-слоевого осаждения;
— оптика на кристалле для межсоединений верхнего уровня УБИС.

Все авторы статей, включенных в тематический блок журнала, – участники инициативных проектов, поддержанных РФФИ.

В соответствии с перечисленной проблематикой, ряд статей сборника посвящен работам по созданию и исследованию свойств диэлектрических материалов с низкой диэлектрической проницаемостью. Представлены наиболее интересные материалы – пери-

одические мезопористые органосиликаты с углеродными мостиковыми группами между атомами кремния, формируемые методами молекулярной самосборки. В статье А.А. Резванова, А.С. Вишневского, Д.С. Серегина, А.А. Ломова, К.А. Воротилова и М.Р. Бакланова «Гибридные органосиликатные low-*k*-диэлектрики с бензольными мостиковыми группами с повышенной механической прочностью и малым размером пор для современной BEOL металлизации» описаны синтез и исследование таких органосиликатных low-*k*-диэлектриков, в которых часть кремний-кислородных связей замещена бензольными мостиковыми группами, что позволило существенно увеличить величину модуля Юнга пленок. В данной работе впервые обнаружен интересный эффект формирования кристаллоподобной структуры в пористых пленках, связанный с самопроизвольным взаимодействием бензольных групп. Этот механизм позволяет дополнительно укрепить стенки каркаса пористой пленки. Однако одним из существенных ограничений подобных диэлектрических материалов является наличие непрореагировавших остаточных силанолов, которые являются причиной сорбции атмосферной воды, приводящей к деградации электрических параметров пленок. Работа А.С. Вишневского, Д.А. Воротынцева, Д.С. Серегина, К.А. Воротилова, А.С. Сигова и М.Р. Бакланова «Исследование тонких пористых пленок на основе прекурсора, содержащего фениленовые мостиковые группы» была направлена на гидрофобизацию микропористой органосиликатной пленки с бензольными мостиковыми группами путем модификации ее поверхности парами гексаметилдисилазана. Гидрофобизация позволила уменьшить количество остаточных силанолов, несмотря на малый размер пор. Авторы отмечают позитивный эффект упрочнения стенок микропор при термообработке гидрофобизированных пленок.

Второй важнейший компонент BEOL-технологии – новые металлические нанопроводники и технологии их формирования. В работе А.Е. Рогожина, О.О. Пермяковой, Е.А. Смирновой, А.А. Ломова, С.Г. Симакина и К.В. Руденко «Альтернативная технологическая схема и процессы формирования структур многоуровневой металлизации УБИС на основе рутения» рассмотрены процессы формирования одного из наиболее перспективных материалов – рутения. Авторы использовали метод атомно-слоевого осаждения, стимулированного плазмой (PEALD), и обнаружили различные механизмы роста пленки Ru, включая переход от осаждения оксида рутения к металлическому рутению в определенном технологическом окне параметров процесса. Одновременно авторами изучены вопросы анизотропного плазмохимического травления рутения и продемонстрированы основные этапы субтрактивной технологии формирования системы межсоединений на основе нанопроводов рутения с сечением 30×30 нм. И.И. Амиров, А.Н. Куприянов, В.В. Наумов, М.О. Изюмов, Д.Г. Волошин, А.Н. Кропоткин, Д.В. Лопаев и Т.В. Рахимова в статье «Основные аспекты формирования металлизации в субдесятинанометровой технологии изготовления интегральных схем» представили результаты процессов травления пленок Mo, W, Ru в галогенсодержащей плазме с использованием разработанного лазерно-интерферометрического *in-situ* метода контроля. Важным результатом работы стала демонстрация возможности прецизионного атомно-слоевого травления W и Mo в хлор- и фторсодержащей плазме.

Задача снижения уровня деградации диэлектриков с ультранизкой диэлектрической проницаемостью в плазмохимических процессах структурирования остается актуальной в технологии Damascene. Статья Д.В. Лопаева, Т.В. Рахимовой, Ю.А. Манкелевича и Е.Н. Ворониной «Температурные эффекты и механизмы воздействия атомов O, N и F на SiOCH нанопористые диэлектрики» посвящена анализу фундаментальных механизмов воздействия активных радикалов на нанопористые органосиликатные low-*k*-диэлектрики с низкой диэлектрической проницаемостью. Авторы детально анализируют механизмы взаимодействия атомов фтора, азота и кислорода с low-*k*-диэлектриками с разным размером пор и степенью пористости, используя экспериментальные данные и методы квантово-механического моделирования. С той же целью в работе А.В. Мяконьких, Р.А. Гайдукасова и В.О. Кузьменко «Исследование методов анизотропного плазмохимического травления low-*k* слоев с защитой пористой структуры материала» изучены процессы малоповреждающего криогенного плазменного травления диэлектриков с ультранизкой диэлектрической проницаемостью. Для защиты пор диэлектрика вне зоны травления от активных компонентов плазмы в работе использован метод предварительного их заполнения конденсирующимся

газом, что позволило сформировать в органосиликатном пористом диэлектрике необходимые анизотропные структуры канавок без повреждения пористой структуры в целом. В статье «Анализ возможности независимого регулирования различных параметров плазмы ВЧ несамостоятельного разряда с дополнительной ионизацией электронным пучком» М.А. Богданова, Д.В. Лопаев, О.В. Прошина, Т.В. Рахимова и А.Т. Рахимов демонстрируют результаты исследования нового типа плазмы несамостоятельного ВЧ-разряда низкого давления с дополнительной ионизацией пучками высокоэнергетичных электронов. Предложенный подход открывает перспективы прецизионной обработки поверхности плазмой с очень низкой энергией ионов (порядка нескольких эВ), используемой в технологиях атомного слоевого травления и осаждения в плазменных реакторах нового поколения. А.Ф. Паль, А.Н. Рябинкин, А.О. Серов, Д.В. Лопаев, Ю.А. Манкелевич, А.Т. Рахимов и Т.В. Рахимова в своем сообщении «Исследование ВУФ излучения плазмы и структуры магнетронного разряда постоянного тока» представили результаты исследований плазмы магнетронного разряда постоянного тока, включая измерения интенсивности вакуумного УФ излучения плазмы, являющегося одной из основных причин деградации органосиликатных пористых low-*k* материалов.

В работе Г.А. Командина, А.С. Вишневского, Д.С. Серегина, К.А. Воротилова, К.В. Руденко, А.В. Мяконьких и И.Е Спектора «Определение электродинамических параметров тонких пленок в составе гетероструктур методами терагерцевой и инфракрасной спектроскопии» исследованы механизмы потерь, дающие вклад в диэлектрическую проницаемость low-*k*-диэлектриков. Впервые были проведены исследования функции диэлектрического отклика тонких пленок в ТГц-диапазоне частот. Авторы установили, что доминирующими механизмами, формирующими квазирелаксационную полосу в ТГц-области, являются структурный беспорядок – бозонный пик в стекле – и уровень влагонасыщенности в пористой среде. Последнее указывает на необходимость специальных приемов для работы с такими материалами на всем маршруте создания системы многоуровневой металлизации ИС.

А.В. Садовников и А.А. Мартышкин в своей статье «Функциональные межсоединения на основе квазидвумерных и трехмерных магнонных структур в латеральных и вертикальных топологиях» рассматривают альтернативные методы передачи и обработки сигналов между активными элементами интегральных схем, основанные на принципах магноники. Авторы демонстрируют механизм управления передачей спин-волнового сигнала в трехмерных магнонных структурах, образованных ортогональным сочленением магнитных полосок железо-иттриевого граната.

В работе «Исследование свойств магнитооптических пленок и пленочных наноструктур для интегрально-оптических невзаимных устройств межсоединений верхнего уровня УБИС» Е.А. Вилков, С.С. Сафонов, А.Г. Темирязев, А.С. Федоров, А.А. Федорова и М.В. Логунов исследовали синтез и моделирование магнитооптических пленок и пленочных наноструктур для интегрально-оптических невзаимных устройств межсоединений верхнего уровня ультрабольших интегральных схем. На основе результатов этих исследований показана возможность разработки быстродействующих устройств оптики-на-кристалле, включая устройства терагерцевого диапазона частот.

Важность проведенных фундаментальных и прикладных работ в рамках выполненных проектов сформированными в рамках конкурса РФФИ российскими научными коллективами особенно ярко демонстрирует современная ситуация в отечественной микроэлектронике. Все разработанные материалы и технологии для систем многоуровневой металлизации ИС недоступны к импорту из-за рубежа в настоящее время. Поэтому проведенные исследования представляют собой первый уверенный шаг на пути создания передовых отечественных технологий BEOL в микро- и наноэлектронике.