Плазменные нанотехнологии с атомными масштабами точности

Руденко К.В., Лукичев В.Ф.

Физико-технологический институт имени К.А. Валиева РАН, Москва, Россия, [rudenko@ftian.ru](mailto:rudenko@ftian.ru)

Низкотемпературная химически активная плазма уже около 50 лет является одним из основных инструментов создания приборных структур интегральных схем (ИС). С ее помощью методами планарной технологии последовательно формируются тонкие пленки полупроводников, диэлектриков, металлов, а затем, также путем селективного воздействия плазмы на поверхность этих пленок, топология рисунка литографических масок передается в функциональные слои, - тем самым формируется конструкция интегральных приборов и электрическая схема их соединениий. В основе таких плазменных технологий лежат гетерогенные плазмостимулированные реакции на поверхности структур на кремниевых подложках. В современной микроэлектронике, в ХХI веке трансформировавшейся в электронику наноразмерных приборов (наноэлектронику), минимальные топологические размеры достигли величины 7 – 10 нм, а толщина ряда функциональных слоев, составляющих прибор, еще меньше – до 2 – 3 нм. Таким образом, линейные размеры областей полупроводниковых приборов составляют 15 – 50 постоянных кристаллической решетки материалов. Поэтому технологии, обеспечивающие как осаждение, так и структурирование слоев с точностью в *один атомный монослой* весьма востребованы. Такая точность возможна при условии использования насыщающихся (самоограничивающихся) гетерогенных реакций на поверхности формируемых наноструктур. Монослойное разрешение подразумевает проведение процессов осаждения либо cелективного анизотропного травления (структурирования) тонких пленок в циклическом режиме.

Прецизионное атомно-слоевое осаждение (ALD) функциональных пленок реализуется с использованием реакций окисления или восстановления единственного монослоя первого прекурсора, химически сорбированного на поверхности. В результате реакции со вторым компонентом-прекурсором формируется строго один монослой целевого материала (диэлектрика, металла, полупроводника). Механизм насыщения реакции обусловлен конечной плотностью центров хемосорбции на поверхности и значительной разницей энергии хемисорбированных и избыточных физисорбированных молекул, что позволяет провести предварительное селективное удаление последних. Инициирование гетерогенной реакции низкотемпературной плазмой газа второго прекурсора обеспечивает ряд преимуществ, рассмотренных в докладе. Обсуждены специфические требования к плазме, применяющейся в процессах PEALD. Приведены примеры внедрения технологий PEALD при формировании структур наноэлектронных приборов.

Атомно-слоевое травление (ALEt) предложено значительно позже процесса ALD в связи с длительным поиском механизмов, обеспечивающих самоограничение гетерогенных реакций плазмостимулированного травления. Показано, что простые импульсные режимы с импульсными источниками плазмы не обеспечивают воспроизводимости от цикла к циклу, и по площади пластины на монослойном уровне. В результате, циклический процесс ALEt организован как «реверс» процесса ALD, в котором после хемосорбции монослоя активного прекурсора на поверхности следует активирование гетерогенной реакции с монослоем материала на поверхности и десорбция продукта реакции воздействием на поверхность химически инертными ионами плазмы в узком энергетическом окне. Здесь атомно-слоевой режим обеспечивается отсутствием спонтанной химической реакции молекул и радикалов плазмы с поверхностью. Продемонстрированы возможные применения процессов ALEt, способные значительно улучшить характеристики приборов наноэлектроники, а также создать перспективные приборы на 2D-материалах.