

77-30569/ Формирование островковых наноструктур в вакууме

10, октябрь 2011

авторы: Сидорова С. В., Юрченко П. И.

УДК 621.3.049

Sidorova_bmstu@mail.ru,

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что свойства тонкой пленки отличаются от свойств массивного материала, особенно если толщина пленки очень мала. Эта «особенность» определяется спецификой структуры пленки, которая в свою очередь, обусловлена процессами образования тонкой пленки. Существует большое количество методов и процессов получения тонких пленок (от прокатки до осаждения материала на подложку атом за атомом). Чаще всего тонкие пленки получают методами осаждения [1].

Образование тонких пленок в вакууме происходит в несколько этапов. Укрупненно можно выделить следующие этапы образования пленки [2]:

- образование зародышей;
- рост зародышей, образование островков;
- коалесценция островков;
- образование каналов;
- рост сплошной пленки.

Для современной науки (разделы электроники: микро- и нанoeлектроника) и техники большой интерес представляют островковые пленки, то есть пленки, формирование которых завершили на этапе образования островков. Уникальные свойства (электронные, оптоэлектронные и др.) островковых пленок связаны с тем, что их размеры во всех трёх измерениях лежат в нанометровом диапазоне. Этот факт обуславливает эффект размерного квантования энергетических уровней электрона, находящегося внутри островковой наноструктуры (островка). Поведение электрона внутри наноразмерного островка подобно его поведению внутри трёхмерной потенциальной ямы. По этой причине островковые пленки или

островковые наноструктуры (ОНС) диаметром от 2 до 10 нм получили название «квантовые точки» [3].

Сравнительно недавно стало известно о создании нанотранзистора с квантовыми точками в канале. Формирование квантовых точек в канале нанотранзистора позволяет в полной мере реализовать преимущества квантовых эффектов – туннелирование и размерное квантование энергетического спектра носителей заряда.

В настоящее время активно проводятся исследования по изготовлению вертикально излучающего лазера на квантовых точках. Работа лазера основана на наличии дискретного спектра уровней, между которыми могут происходить электронные переходы. Используется механизм инверсной заселенности уровней, при которой на более высокоэнергетичном уровне накапливается большее количество электронов, чем на уровне, лежащем ниже. Квантовые точки играют роль активных атомов.

Островковые структуры находят свое применение и в наноэлектронике в качестве каталитических затравок для направленного выращивания *углеродных нанотрубок* (УНТ). Таким образом, актуальность применения ОНС очевидна и неоспорима.

Для создания квантово размерных наноструктур известны два подхода в технологии: «сверху-вниз» и «снизу-вверх». Технология «сверху-вниз» подразумевает организацию квантовых наноструктур при обработке макромасштабного объекта с постепенным уменьшением его размеров. Противоположный подход «снизу-вверх» состоит в том, чтобы набрать, соединить, выстроить отдельные атомы и молекулы в упорядоченную структуру [3].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА ОСТРОВКОВЫХ НАНОСТРУКТУР

Во всех теориях зародышеобразования в тонких пленках [1] первым этапом считается столкновение молекулы пара с подложкой. После столкновения молекулы пара могут адсорбироваться и прочно закрепиться на подложке, могут через конечный промежуток времени после адсорбции снова испариться и, наконец, могут мгновенно отразиться от подложки, как свет от зеркала. В общем случае атомы падают на поверхность подложки с энергиями, значительно большими kT , где T – температура подложки. Поэтому возникает вопрос, сможет ли такой атом пара достаточно быстро придти в равновесие с подложкой так, чтобы смогла произойти его адсорбция, или он отразится от подложки, не отдав ей при этом всей своей запасенной энергии.

Много работ посвящено вопросам изучения и моделирования этапов роста островковых пленок. Существует две теории образования тонких пленок, которые описывают этапы

зародышеобразования. Основой для существующих теорий служат модели роста тонкой пленки: капиллярная и атомная [1].

Для капиллярной модели скорость j_k [шт./м²с] образования зародышей вычисляется из выражения:

$$j_k = Cv \exp\left(\frac{\Delta G_{des} - \Delta G_{sd} - \Delta G^*}{kT}\right), \quad 1)$$

где C – постоянная, учитывающая геометрические параметры; v – скорость осаждения; ΔG_{des} – свободная энергия активации десорбции; ΔG_{sd} – свободная энергия активации поверхностной диффузии адсорбированных атомов; ΔG^* – изменение свободной энергии при образовании критического зародыша; T – температура подложки; k – постоянная Больцмана.

Для атомной модели скорость j_A [шт./м²с] образования зародышей вычисляется из выражения:

$$j_A = Cv \exp\left(\frac{(i^* + 1)E_a + E_i^* - E_d}{kT}\right), \quad 2)$$

где i^* – число атомов в критическом зародыше; E_a – энергия активации десорбции адсорбированного атома; E_i^* – энергия диссоциации критического зародыша на адсорбированные атомы; E_d – энергия активации поверхностной диффузии адсорбированных атомов. Значение размерного коэффициента для атомной модели определяется из выражения:

$$C = a_0 y N_0 \left(\frac{v}{v_1 N_0}\right)^i, \quad 3)$$

где a_0 – длина диффузионного перескока адсорбированного атома (приблизительно равна постоянной решетки подложки, для расчетов выбран кремний); y – длина окружности, ограничивающая поверхность зародыша, на которую возможно поступление атомов из паровой фазы; N_0 – плотность мест, на которые могут адсорбироваться атомы; v_1 – частота десорбции адсорбированного атома.

Обе модели в общем виде описывают зависимость скорости j образования зародышей от энергетических параметров. Капиллярная модель (1) является наиболее понятной, но не всегда дает информацию о размерах критических зародышей и об изменении скорости зародышеобразования. Атомная модель (2) похожа на капиллярную, но в ней делается акцент на размер зародышей маленького размера (несколько атомов). Для дальнейшего изучения выбрана

атомная модель роста, т.к. она учитывает изменение скорости образования зародышей даже при изменении размера зародыша лишь на один атом.

Подставив (3) в (2), получаем следующее выражение для определения скорости j [шт./м²с] образования критических зародышей для атомной модели:

$$j = a_0 y N_0 \left(\frac{v}{v_1 N_0} \right)^i v \exp\left(\frac{(i^* + 1)E_a + E_i^* - E_d}{kT} \right) \quad 4)$$

Для того, чтобы определить начальное время образования островков, необходимо знать,

когда подложка будет «заполнена» максимально возможным количеством $N_{\max} = \sqrt{\frac{N_0 v}{v_1} \cdot \exp\left(\frac{E_d}{kT}\right)}$ [шт./м²] зародышей критического размера. После этого этапа начинается рост островков. Таким образом, необходимо знать время t [с] образования максимального количества зародышей критического размера:

$$t = \frac{N_{\max}}{j} \quad 5)$$

В результате анализа литературных данных были выбраны значения необходимых для расчета параметров и по выражению (5) построены зависимости времени образования максимального количества зародышей критического размера от температуры подложки (рис. 1). Для расчетов была принята скорость осаждения 10⁻⁹ кг/м²с. Число атомов в критическом зародыше для кривых 1, 2, 3, 4 – 5 шт.; для кривых 1', 2', 3', 4' – 3 шт.

Из рис. 1 видно, что время образования максимального количества критических зародышей очень мало (~ 10⁻¹⁶ с) и сильное влияние оказывают энергетические параметры, в том числе температура подложки.

Построенная зависимость, определяющая взаимосвязь температуры подложки и энергии активации десорбции адсорбированных атомов, рассчитана для скорости осаждения (10⁻⁹ кг/м²с) меди на кремниевую подложку. Также были построены аналогичные зависимости для скорости осаждения меди на кремниевую подложку 10⁻⁵ кг/м²с. При расчетах было установлено, что при большей скорости осаждения (10⁻⁵ кг/м²с) для образования максимального количества зародышей критического размера достаточно меньшей температуры подложки примерно на 100...200 К.

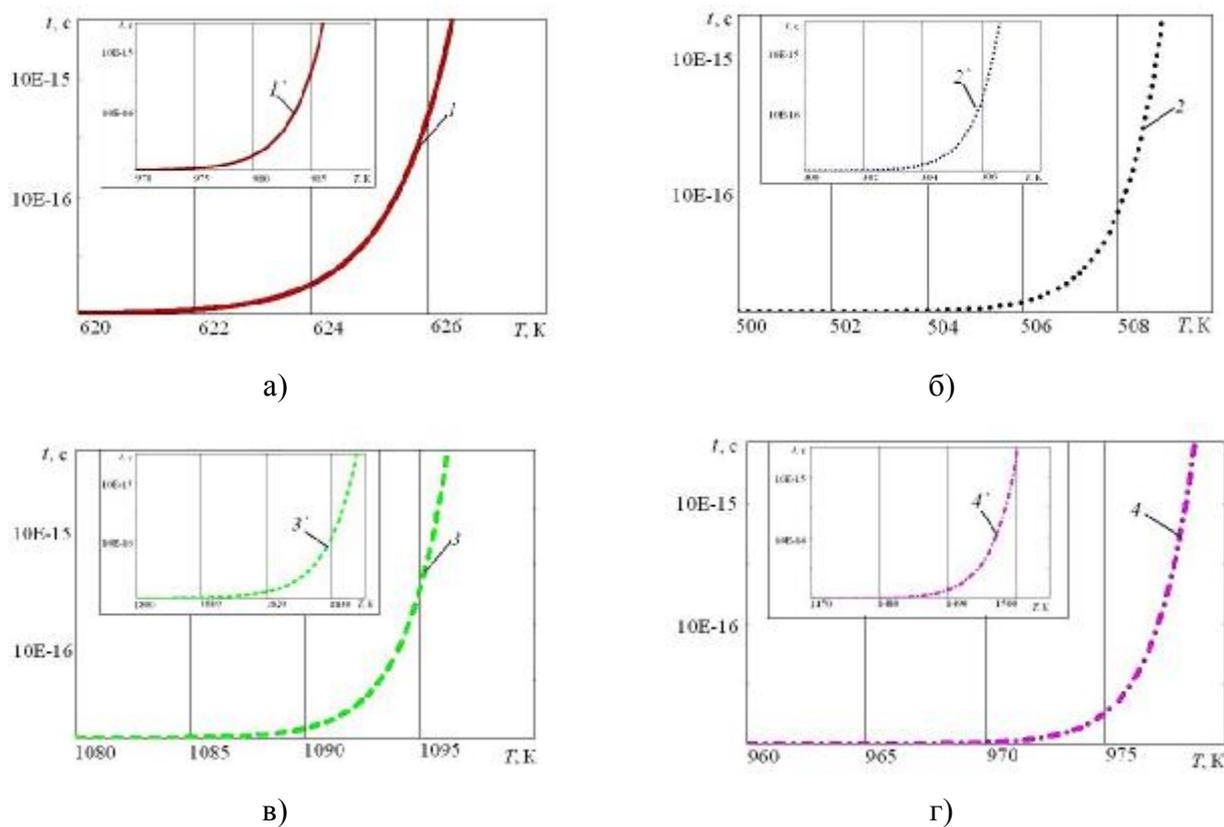


Рис. 1. Взаимосвязь времени образования максимального количества зародышей критического размера и температуры подложки:

1, 1' – исходные значения ΔE_d и ΔE_a ; 2, 2' – $\Delta E_d > \Delta E_a$;

3, 3' – $\Delta E_a > \Delta E_d$; 4, 4' – значения энергий ΔE_d и ΔE_a увеличены

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования формирования островковых наноструктур были проведены на экспериментальном стенде, который состоит из:

- малогабаритной вакуумной установки модульного типа (рис. 2);
- пикоамперметра Keithley;
- блока питания и внутрикамерной оснастки (рис. 3).

Суть экспериментальных исследований заключалась в том, что в процессе нанесения материала на подложку в вакууме происходит измерение силы тока с подложки (т.к. проявляется туннельный эффект между сформированными островковыми наноструктурами). Для того чтобы было возможно измерить силу тока, на подложку предварительно наносят контактные площадки, которые замыкают в предварительно собранную цепь для измерения силы тока. В качестве материала подложки использовали ситалл и кремний.



Рис.2. Малогабаритная вакуумная установка модульного типа

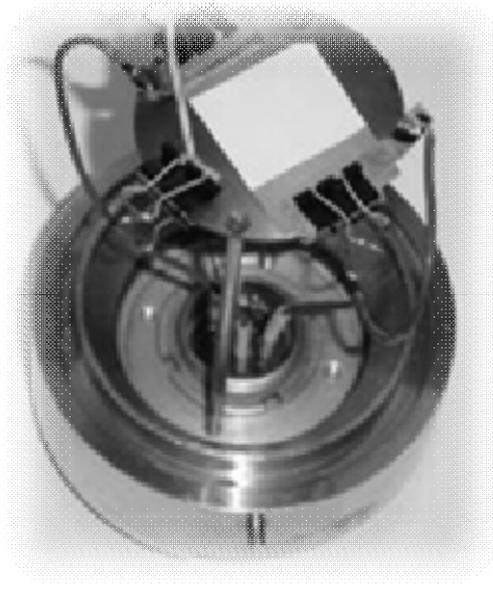


Рис.3 . Внутрикамерная оснастка, подложка с контактными площадками

Для формирования островковых наноструктур был выбран метод термического испарения [3]. Экспериментальные исследования проводили при нанесении на подложки (из ситалла или кремния) меди. В момент начала испарения меди с испарителя включали пикоамперметр фирмы Keithley, с помощью которого фиксировали значение силы тока между контактными площадками. Процесс останавливали при достижении значения силы тока на пикоамперметре 25, 250 и 2500 нА.

На рис. 4 представлена одна из полученных зависимостей силы тока от времени напыления меди на ситалловую подложку. Точка *A* свидетельствует о появлении тока на подложке. Что может означать начало образования островковых наноструктур, появление туннельного тока. В момент, когда ток достиг точки *B*, была закрыта заслонка и прекращено испарение меди. После точки *B* ток начинает уменьшаться (примерно до 10 нА). Причиной этому может служить появившийся сорбат на поверхности подложки, который препятствует протеканию тока.

Падение силы тока является объектом дальнейших исследований. Вероятно, уменьшение силы тока объясняется потоком натекания атмосферы, влияние которого при прекращении испарения меди, становится существенным. К подложке устремляются атомы, адсорбируются на ней, увеличивая тем самым её сопротивление.

I, нА

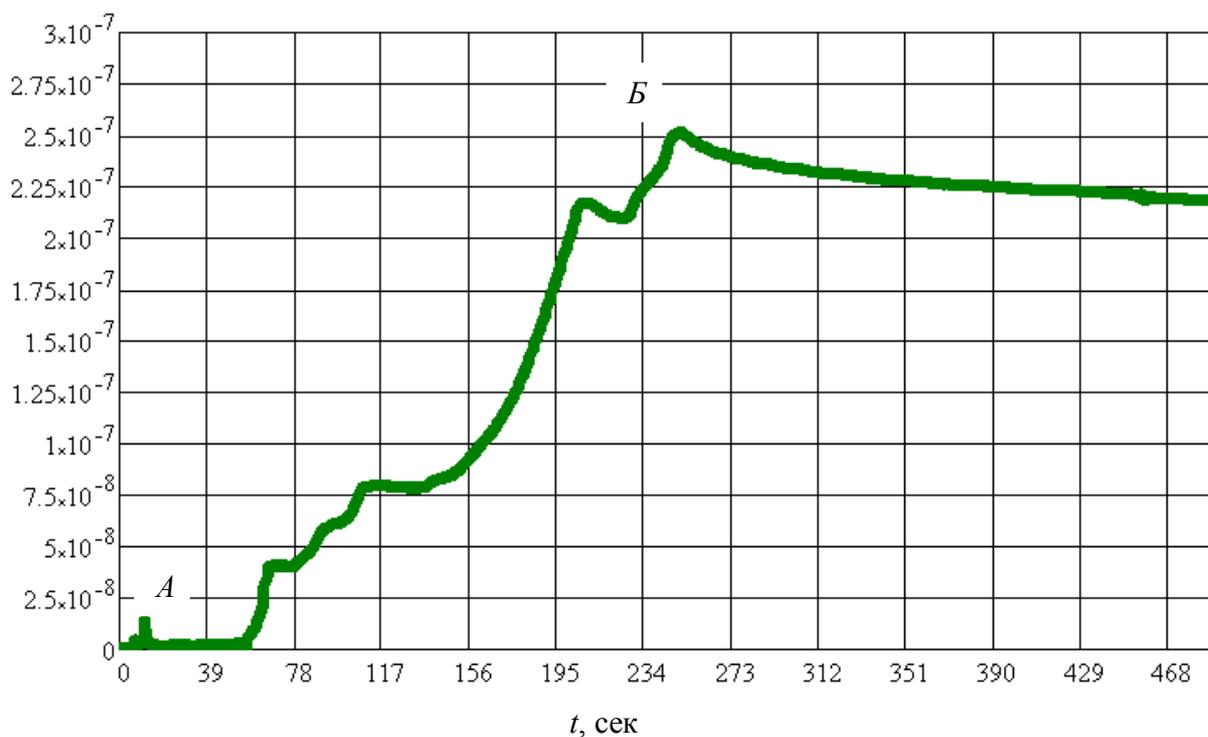


Рис.4. Зависимость силы тока от времени в процессе напыления меди на ситалловую подложку

Были проведены эксперименты для каждого диапазона силы тока. Далее образцы были исследованы на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) SolverNEXT фирмы NT-MDT на предмет топологии получившихся структур и их размеров (рис. 5, 6).

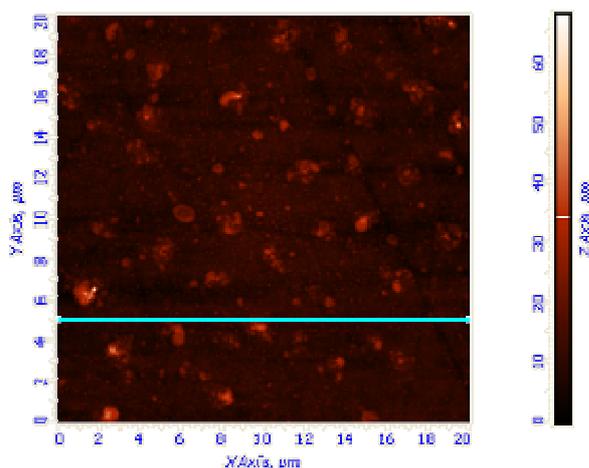


Рис.5. 2D-изображение островков меди на ситалловой подложке при токе 25 нА, размер области сканирования 20x20 мкм

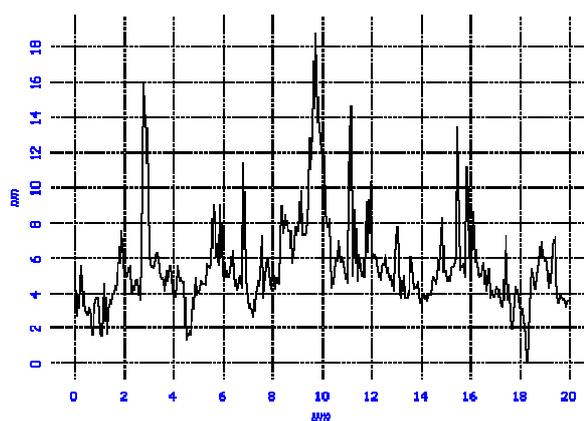


Рис.6. Шероховатость островков меди на ситалловой подложке при токе 25 нА

При анализе полученных сканов выявлено, что при токе 25 нА средний размер островковых наноструктур достигает 18 нм, а при токе 250 нА – 35 нм. Таким образом, варьируя током на пикоамперметре, появляется возможность получать островковые наноструктуры заданного размера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические исследования показали, что при большей скорости осаждения (10^{-5} кг/м²с) для образования максимального количества зародышей критического размера достаточно меньшей температуры подложки примерно на 100...200 К. В дальнейшей работе планируется проведение экспериментальных исследований по контролю роста ОНС, используя полученный температурный диапазон 500...1500 К для нагрева подложки.

Проведенные эксперименты позволили проанализировать режимы формирования ОНС методом термического испарения в вакууме. Исследования сканов образцов на АСМ определили, что при увеличении силы тока на образце расстояния между ОНС сокращаются, неравномерность высот по поверхности подложки уменьшается. Также при анализе полученных сканов выявлено, что при токе 25 нА средний размер островковых наноструктур достигает 18 нм, а при токе 250 нА – 35 нм.

Список литературы:

1. L. Maissel, R. Glang. Handbook of Thin Film Technology. McGraw Hill Hook Company, 1970. V. 2. 768 p.
2. Борзяк П.Г., Кулюпин Ю.А. Электронные процессы в островковых металлических пленках. Киев: Наукова думка. 1980. 240 с.
3. Панфилов Ю.В., Сидорова С.В. Методы формирования островковых наноструктур // Материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России». М.: ЦНИТИ Техномаш, 2009. С. 372–375.

77-30569/259672 Islet nanostructures formation in vacuum

10, October 2011

authors: Sidorova S. V., Yurchenko P., I.

Model and results of study nanostructures islet formation in vacuum by thermal evaporation are presented. The experimental stand and control technique of growth of islet nanostructures during the deposition are presented. The dependence of island sizes of nanostructures on the technological parameters of deposition is shown.

Spisok literatury:

1. L. Maissel, R. Glang. Handbook of Thin Film Technology. McGraw Hill Hook Company, 1970. V. 2. 768 p.
2. Borzyak P.G., Kulyupin Yu.A. Elektronnye processy v ostrovkovykh metallicheskih plenках. Kiev: Naukova dumka. 1980. 240 s.
3. Panfilov Yu.V., Sidorova S.V. Metody formirovaniya ostrovkovykh nanostruktur // Materialy XV Mejdunar. nauch.-tehn. konf. «Vysokie tehnologii v promyshlennosti Rossii». M.: CNITI Tehnomash, 2009. S. 372–375.