

Формирование сверхтонких нанокompозитных структур SiO₂:Au методом импульсного лазерного осаждения

**А. В. Зенкевич, Ю. Ю. Лебединский, А. А. Тимофеев, В. Н. Неволин,
Д. А. Антонов, Д. О. Филатов, Г. А. Максимов**

Предложен способ формирования систем нанокластеров Au, захороненных в сверхтонком диэлектрическом слое SiO₂ толщиной ~ 5 нм путем совместного осаждения наноразмерных слоев Si – Au в вакууме методом импульсного лазерного осаждения и их последующего окисления в плазме тлеющего разряда при комнатной температуре. Эволюция химического состояния золота и кремния в процессе формирования структур SiO₂:HK – Au исследована *in situ* методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Анализ структурных и электрофизических свойств структур методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), комбинированной сканирующей туннельной/атомно-силовой микроскопии (СТМ/АСМ) указывает на формирование двумерных систем нанокластеров Au с латеральными размерами в пределах 3 – 5 нм, расстояние между кластерами ~ 20 нм, которые располагаются на строго заданной глубине в сверхтонком слое SiO₂.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется разработке методов формирования и исследованию нанокompозитных структур, представляющих собой системы металлических и полупроводниковых кластеров нанометрового размера (нанокластеров, НК), диспергированных в тонкопленочных диэлектриках. Такие структуры представляют интерес в качестве среды, способной хранить заряд, локализованный на нанокристаллах, поскольку их можно использовать в качестве плавающих затворов в полевых транзисторах, ячейках энергонезависимой памяти (nano-flash) [1]. При этом отмечалось [2–4], что аккумуляция заряда в слое НК может быть лимитирована одноэлектронными эффектами, которые проявляются при очень малых размерах НК. Так, в работе [2] продемонстрировано, что при уменьшении зарядового слоя и НК до очень малых размеров одноэлектронные эффекты проявляются при комнатной температуре, что приводит к появлению ступенчатых характеристик порогового напряжения как функции смещения на затворе. В

этом подходе использовали сочетание литографических методов с процессами самоограничивающегося окисления, что позволило сократить характерные размеры до 30 нм.

Другой подход к разработке технологии энерго-независимой памяти следующего поколения заключается в использовании эффекта обратимого изменения сопротивления тонкопленочных слоев некоторых диэлектриков при приложении напряжения противоположного знака (resistive switching random access memory, ReRAM), где металлические нанокластеры в объеме диэлектрических слоев могут улучшать электрофизические характеристики [5].

К настоящему времени имеется большое количество экспериментальных работ, описывающих различные способы получения такого рода структур [6, 7]. Формирование и исследования структур с инкорпорированными массивами НК проводятся с использованием трех основных подходов: ионной имплантации [1], осаждения сверх-стехиометрических слоев оксида [8] и, наконец, осаждение многослойных структур с последующим окислением [9].

Среди различных нанокompозитных структур система $\text{SiO}_2\text{:HK} - \text{Au}$ представляет особый интерес. Поскольку Au и Si не образуют стабильных химических соединений, а также отсутствует стабильный оксид золота, возможен процесс, при котором образование системы HK – Au может осуществляться при низкотемпературном окислении аморфной смеси Au – Si за счет сегрегации атомов золота в процессе формирования оксида кремния.

Для осуществления такого процесса критически важным является изначальное формирование однородной аморфной смеси атомов Au и Si. В частности, для этой цели может быть использован метод импульсного лазерного осаждения (ИЛО), который, в силу импульсного характера и малой ($\sim 0,01$ монослоя) скорости осаждения за импульс, позволяет исключительно хорошо перемешивать компоненты при последовательном осаждении из элементных мишеней.

В настоящей работе описан способ формирования наноразмерных структур $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2\text{:HK} - \text{Au}/\text{SiO}_2$, сформированных путем совместного осаждения Au и Si методом ИЛО с последующим окислением в кислородной плазме тлеющего разряда, и представлены результаты исследований микроструктуры и электрофизических свойств полученных нанокompозитных структур.

Экспериментальная часть

Формирование тонкопленочных структур $\text{SiO}_2\text{:HK} - \text{Au}$ осуществляли методом ИЛО в сочетании с окислением в кислородной плазме тлеющего разряда при комнатной температуре в одном вакуумном цикле. В качестве подложек, при исследовании электрофизических свойств плёнок с нанокластерами методом туннельной спектроскопии с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) в режиме измерения тока между АСМ зондом и подложкой, использовали пластины сильнолегированного кремния $n^{++}\text{-Si}(100)$ (марки КЭМ-0,005); удаление слоя естественного оксида и пассивация поверхности непосредственно перед загрузкой в вакуумную камеру производили по стандартной методике травлением поверхности образцов в 5%-ном растворе HF. Отсутствие остаточного оксида, а также других загрязнений на поверхности подложек перед началом процесса формирования нанокompозитного слоя, контролировали методом РФЭС в исследовательском комплексе на базе электронного спектрометра XSAM-800 (Kratos). Данный комплекс, схема которого представлена на рис. 1, позволяет растить наноразмерные многослойные структуры

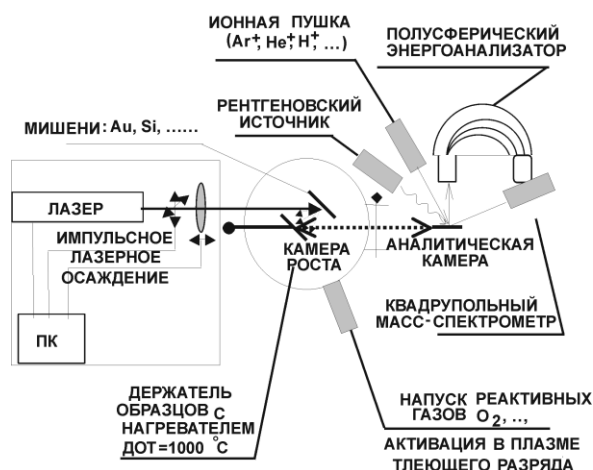


Рис. 1. Схема исследовательского комплекса ИЛО-РФЭС на базе электронного спектрометра XSAM-800 (Kratos).

методом ИЛО и производить *in situ* анализ несколькими поверхностно-чувствительными методами, в частности, РФЭС. Для проведения структурных исследований методом ПЭМ, сверхтонкие нанокompозитные структуры $\text{SiO}_2\text{:HK} - \text{Au}$ формировали на свежесколотой поверхности подложки монокристаллов NaCl(100). В дальнейшем формирование структур проводили в несколько этапов: 1) на первом этапе, на поверхности подложки Si окислением в кислороде, активированном плазмой тлеющего разряда ($P_{\text{O}_2} \approx 10^{-2}$ Торр, $U = 800$ В), формировался слой SiO_2 ; толщина x которого (~ 2 нм) определялась, в основном, параметрами плазмы кислорода и измерялась в процессе изготовления образцов по затуханию линии Si^0 неокисленного кремния подложки в РФЭС спектре $\text{Si}2p$ с использованием стандартной методики [10]:

$$x = \lambda_{\text{SiO}_2} \cdot \ln \frac{I_0}{I_1},$$

где I_0 и I_1 — интенсивности линии Si^0 в спектре $\text{Si}2p$ до и после формирования оксидного слоя, соответственно, $\lambda_{\text{SiO}_2} \approx 2,4$ нм — средняя длина пробега электронов в слое SiO_2 . 2) Затем путем попеременного последовательного осаждения субмонослойных покрытий Au и Si методом ИЛО в сверхвысоком вакууме при комнатной температуре проводили формирование аморфного слоя Au – Si. Для лазерной абляции использовали автоматизированный модуль ИЛО в камере препарирования исследовательского комплекса, с использованием сфокусированного излучения 2-й гармоники импульсного лазера YAG:Nd, работающего в режиме модулированной

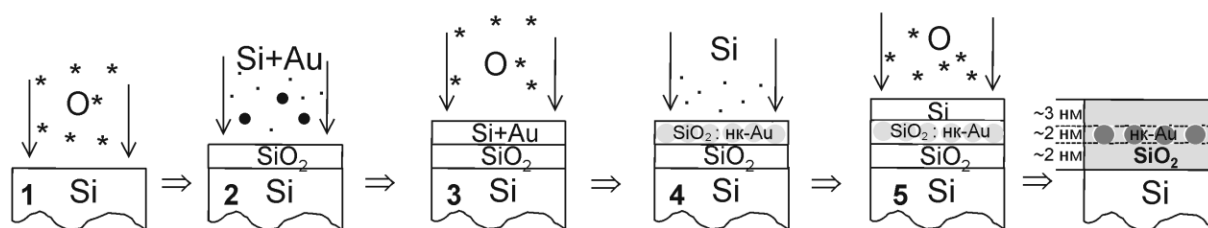


Рис. 2. Последовательность приготовления нанокompозитной структуры $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2:\text{HK-Au}/\text{SiO}_2$ (см. описание в тексте).

добротности (длина волны излучения $\lambda = 532$ нм, энергия в импульсе $E = 0,2$ Дж, длительность импульса $\tau = 15$ нс, частота следования импульсов $\nu = 25$ Гц). Предварительную калибровку скоростей осаждения Au и Si производили методом резерфордского обратного рассеяния (POP), и для обоих элементов скорость осаждения составляла $4 \cdot 10^{12}$ ат/см² ($\sim 10^{-3}$ нм) за импульс. Стехиометрию формируемого слоя Au – Si задавали количеством лазерных импульсов по каждой мишени в программе осаждения. 3) Сформированный в сверхвысоком вакууме слой Au – Si затем окисляли в той же камере в плазме тлеющего разряда при ранее определенных параметрах. Экспериментально установлено, что для полного окисления слоя Au – Si его толщина не должна превышать ~ 2 нм, при этом, структуру формируемого нанокompозитного слоя можно варьировать путем изменения соотношения Au:Si в смеси. 4) На последнем этапе, поверх полученной структуры $\text{SiO}_2:\text{HK} - \text{Au}$ осаждением слоя Si строго заданной толщины в пределах 1 – 3 нм и последующем его окислении при тех же параметрах плазмы создавался еще один слой SiO_2 . На рис. 2 схематично показана последовательность приготовления образцов $n^{++}\text{-Si}/\text{SiO}_2/\text{SiO}_2:\text{HK-Au}/\text{SiO}_2$.

Эволюцию химического состояния Au и Si в процессе формирования нанокompозитной структуры $\text{SiO}_2:\text{HK-Au}$ анализировали *in situ* методом РФЭС в аналитической камере спектрометра XSAM-800 (возбуждение квантами Mg K_{α} с энергией $h\nu = 1253,6$ эВ).

Микроструктурный анализ методом ПЭМ проводили на микроскопе JEM 2000EX (JEOL) при ускоряющем напряжении $U = 180$ кВ. Для проведения исследований ПЭМ сформированные на монокристалле NaCl пленки покрывали дополнительным слоем аморфного углерода методом ИЛО (метод реплик) и переносили на медную предметную сетку. Для пленок $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2:\text{HK} - \text{Au}/\text{SiO}_2$, а также для аналогичных структур без окисления были получены изображения в режиме светлого и темного полей при различных увеличениях и дифракционные картины с выбранных областей.

Исследование электронного транспорта в поперечном направлении (в направлении нормали к поверхности) нанокompозитных структур с металлическими кластерами в тонких диэлектрических пленках проводили *ex situ* методом комбинированной сканирующей туннельной/атомно-силовой микроскопии (СТМ/АСМ) с помощью сверхвысоковакуумного комплекса UHV AFM/STM LF1 (Omicron Nanotechnology GmbH). Рабочее давление в камере составляло $< 10^{-10}$ Топр. В качестве АСМ зондов использовали p^+ -Si кантилеверы, покрытые платиной (марки NSG-01/Pt, производство NT-MDT) с радиусом закругления острия $R_p \approx 35$ нм. Обратная связь удерживалась по АСМ каналу в контактной моде, одновременно измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) туннельного контакта между проводящим кантилевером и n^{++} -Si подложкой через тонкие диэлектрические слои с металлическими включениями. Такой подход позволяет развязать удержание обратной связи и запись ВАХ, что делает возможным изучение свойств электрически неоднородных (частично туннельно-непрозрачных) пленок. Омические контакты из сплава $\text{Sb}_{0,2}\text{Sn}_{0,8}$ формировали с обратной стороны Si-подложки искровым разрядом.

Результаты и обсуждение

Результаты РФЭС

На рис. 3 представлена последовательность спектров РФЭС линий Au4f и Si2p, снятых на различных этапах приготовления нанокompозитной структуры $\text{SiO}_2:\text{HK-Au}$.

Спектр 1, снятый после окисления подложки кремния, позволяет определить толщину сформированного слоя SiO_2 . Используя описанную выше методику расчета толщины оксида на подложке Si, исходя из соотношения интенсивностей линий окисленного (Si^{4+}) и неокисленного (Si^0) кремния в спектре Si2p, получаем $d_{\text{SiO}_2} \approx 1,5$ нм.

Спектр 2 снят после совместного осаждения Au и Si на подложку SiO_2/Si . Аналогично, по затенению

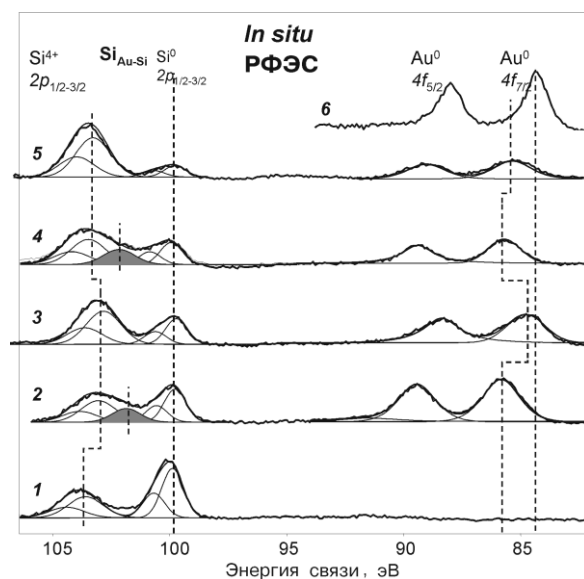


Рис. 3. Спектры РФЭС, снятые *in situ* на различных стадиях роста наноконструктивной структуры: 1 – окисление подложки Si; 2 – со-осаждение Si и Au методом ИЛО; 3 – окисление слоя Au – Si в кислороде, активированном плазмой тлеющего разряда; 4 – осаждение верхнего слоя Si методом ИЛО; 5 – окисление слоя Si; 6 – спектр, снятый на образце металлического Au.

линии Si^0 в спектре 2 можно определить толщину сплавного слоя Au – Si, $d_{Au-Si} \approx 1,6$ нм. Для сформированного слоя Au – Si состав, рассчитанный исходя из интенсивности линий $Au4f$ и Si^0 в спектре $Si2p$ с учетом известных данных калибровки ($q_{Au4f} \approx 22,3$, $q_{Si2p} \approx 1,1$), соответствует Au_1Si_6 . Появившийся дублет $Au4f_{5/2-7/2}$ сдвинут в сторону больших энергий связи по отношению к дублету металлического Au на $\Delta E_{B1} \approx 1,5$ эВ (для сравнения приведен спектр 6 $Au4f$, снятый для металлического образца золота), что указывает на то, что Au образует (метастабильный) силицид. При этом появилась дополнительная линия в спектре $Si2p$ с энергией связи $E_B = 101,9$ эВ, которую мы также связываем с появлением метастабильного силицида золота.

Спектр 3 снят после окисления слоя Au – Si. Дублет $Au4f_{5/2-7/2}$ вернулся в сторону меньших энергий на $\Delta E_{B2} \approx 1,1$ эВ, из чего можно сделать вывод, что почти все золото вернулось в металлическое состояние. Можно предположить, что именно на стадии окисления золото теряет свои метастабильные связи с кремнием и сегрегирует в нанокластеры из оксида кремния. В пользу такого предположения указывает также тот факт, что из спектра $Si2p$ исчезла линия, которую мы связывали с силицидом золота.

Спектр 4 снят после дальнейшего осаждения Si. Линия $Au4f_{5/2-7/2}$ снова сдвинулась в сторону больших энергий связи на $\Delta E_{B3} \approx 1,0$ эВ, что можно объяснить образованием новых силицидных связей между атомами золота в нанокластерах, находящимися на поверхности SiO_2 , и осажденным кремнием.

Спектр 5 снят после окисления осажденного слоя кремния в плазме тлеющего разряда и формирования покровного слоя SiO_2 (capping oxide layer). Рассчитанная толщина этого слоя оксида оказалась равной 1,8 нм.

Таким образом, на основании РФЭ спектров, полученных в процессе роста структуры, и рассчитанных на их основе толщин слоев, сформированный образец представляет собой наноконструктивную структуру $Si/SiO_2(1,5 \text{ нм})/SiO_2:HK-Au(1,6 \text{ нм})/SiO_2(1,8 \text{ нм})$.

Кинетика процесса сегрегации при окислении детально исследуется в настоящее время. Рабочая модель следующая: при окислении самого верхнего слоя атомов кремния в смеси Au – Si образуется очень тонкий слой оксида кремния. Химические связи атомов кремния и золота разрываются, и золото под воздействием локальных напряжений и/или локального нагрева в результате окисления кремния получает дополнительную энергию и выходит на поверхность оксида кремния. Вследствие большой поверхностной диффузии и с целью уменьшения общей поверхностной энергии атомы золота на поверхности объединяются в кластеры надкритического размера.

Результаты ПЭМ

На рис. 4 представлены ПЭМ-изображения пленки a-Si/Au-Si/a-Si, сформированной методом ИЛО в условиях СВВ на подложках NaCl без окисления (рис. 4а), в сравнении с пленкой, подверженной последовательному окислению в плазме тлеющего разряда после осаждения слоев a-Si и Au – Si (рис. 4б). На микрофотографии образца без окисления (рис. 4а) кластеры не наблюдаются, а картина микродифракции (вставка на рис. 4а) указывает на аморфное состояние пленки. В случае образца с послойным окислением (рис. 4б) обнаруживаются кластеры золота с характерным размером $d \sim 3 - 5$ нм, большинство которых в проекции на плоскость пленки имеет округлую форму. Типичное расстояние между кластерами, рассчитанное по статистически большому числу с помощью цифровых методик обработки ПЭМ-изображений, составляет ~ 20 нм. Кластеры занимают около 3% площади образца. На темнопольном изображении кластеры видны в виде

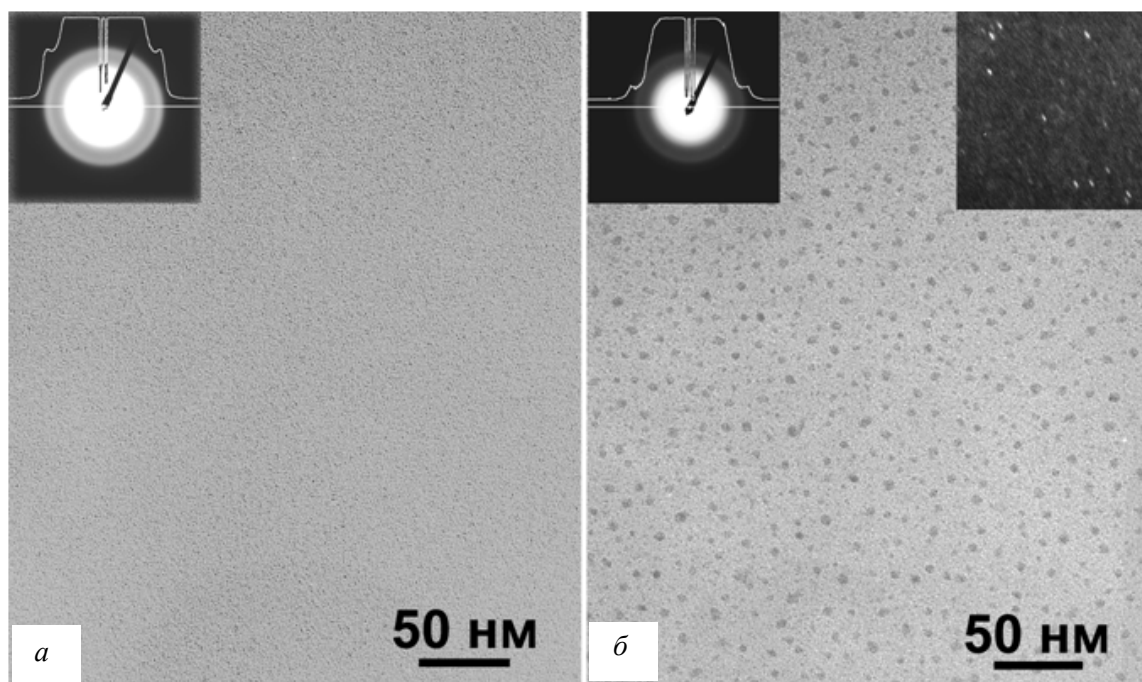


Рис. 4. Фрагменты изображений структур $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2\text{:HK-Au/SiO}_2$, полученных импульсным лазерным осаждением на подложки NaCl: *a* – без окисления (Si/Si-Au/Si); *б* – с послойным окислением.

светлых пятен. Фрагмент такого изображения приведен на вставке на рис. 4 б. Наличие этих пятен указывает на то, что кластеры имеют кристаллическую структуру. В то же время необходимо заметить, что на дифракционной картине (вставка на рис. 4 б), соответствующей окисленному образцу, дифракционные кольца, отвечающие кристаллическому золоту, не видны. Это обстоятельство, по-видимому, связано с тем, что доля Au в кластерах от объема аморфного SiO_2 мала, и на фоне диффузного рассеяния аморфной матрицы SiO_2 дифракция на кластерах золота не обнаруживается.

Из приведенных сравнительных данных анализа ПЭМ можно сделать однозначный вывод, что наблюдаемые кластеры Au нанометрового размера в сформированных тонкопленочных образцах образуются в процессе окисления слоя Au – Si. Параметры этого процесса зависят от соотношения концентраций Au:Si, степени активации кислорода и толщины слоя Au – Si.

Результаты комбинированной АСМ/СТМ

На рис. 5 приведено типичное инвертированное токовое изображение структуры Si/SiO_2 (1,5 нм)/ $\text{SiO}_2\text{:HK-Au}$ (1,6 нм)/ SiO_2 (1,8 нм), полученное при напряжении между зондом и образцом $U = 4$ В.

На токовых изображениях поверхности наблюдались области повышенной проводимости округлой формы размерами 7 – 15 нм, которые мы связываем с туннелированием электронов из зонда в n^+ -Si подложку через кластеры Au в тонком слое SiO_2 . Необходимо отметить, что латеральные размеры каналов туннелирования не определяют размеры

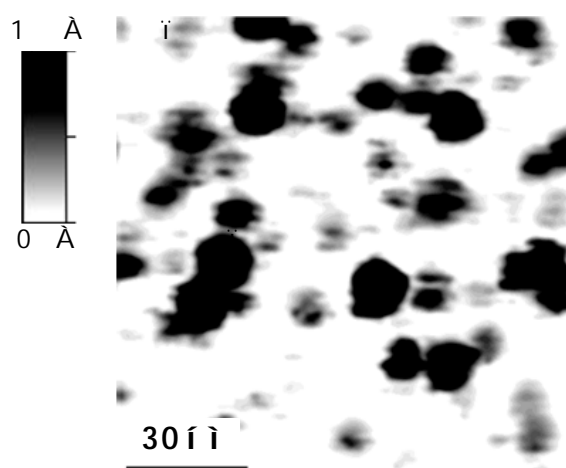


Рис. 5. Инвертированное токовое изображение поверхности структуры Si/SiO_2 (1,5 нм)/ $\text{SiO}_2\text{:HK-Au}$ (1,6 нм)/ SiO_2 (1,8 нм), полученное методом комбинированной СТМ/АСМ. $U_b = 4$ В.

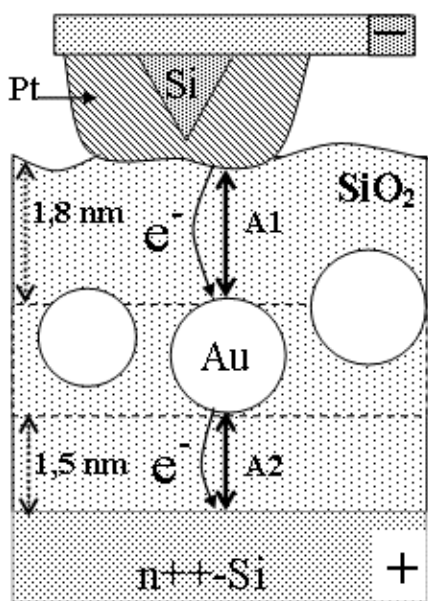


Рис. 6. Схема туннелирования электронов через наноконструктивную структуру Si/SiO₂/SiO₂:HK-Au/SiO₂; A1 – туннельно-прозрачный барьер зонд – кластер, A2 – барьер кластер – подложка.

кластеров, а представляют свертку с формой зонда и зависят от толщины покровного диэлектрика [11]. Таким образом, из токовых изображений нельзя определить размеры кластеров, но можно визуализировать нанокластеры в толще пленки SiO₂ и изучать электронный транспорт в системе “металлизированный зонд – SiO₂:HK-Au:SiO₂-n⁺⁺-Si подложка”. Простейшая схема туннелирования электронов в такой системе приведена на рис. 6.

На ВАХ туннельного контакта АСМ зонда к структуре с нанокластерами Au в сверхтонком слое SiO₂, измеренных в местах расположения нанокластеров Au в SiO₂, были обнаружены характерные особенности в виде резких максимумов (рис. 7).

Форма и положение максимумов по оси напряжений менялись от области к области, а также в пределах одного канала туннелирования. Максимальный ток, измеренный между областями повышенной проводимости, не превышал 25 пА.

Максимумы на ВАХ могут быть объяснены с привлечением теории резонансного туннелирования (см., например, [12], глава 4). В работе [13] предложена модель, объясняющая резкие максимумы на ВАХ, полученных на структурах с ионно-синтезированными кластерами Zr в матрице ZrO₂(Y), резонансным

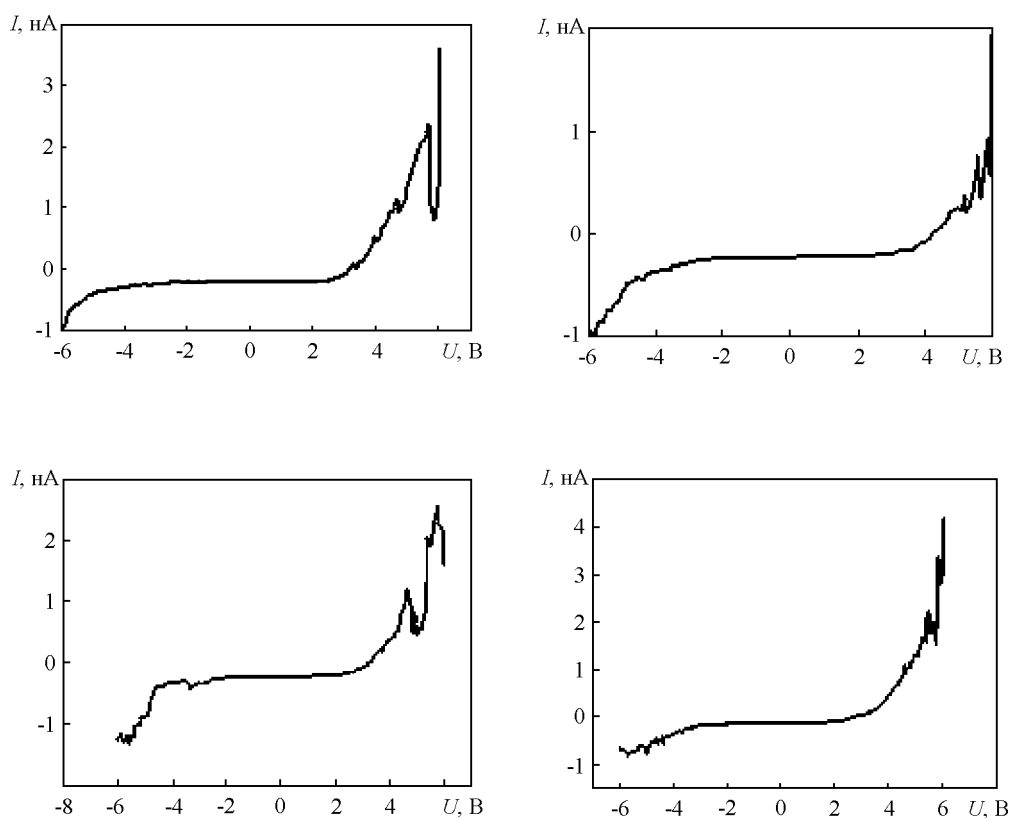


Рис. 7. Типичные ВАХ туннельного контакта АСМ зонда к структуре Si/SiO₂ (1,5 нм)/SiO₂:HK-Au (1,6 нм)/SiO₂ (1,8 нм), измеренные в местах расположения нанокластеров Au в SiO₂.

туннелированием электронов через дискретные уровни в кластере. Модель учитывает зависимость коэффициентов прозрачности барьеров от энергии электронов и от напряжения на структуре и предсказывает значительное изменение вида ВАХ (смещение пиков по оси напряжений, изменение их формы, степени перекрытия) даже при небольшом изменении коэффициента прозрачности одного из барьеров.

Действительно, положение АСМ зонда относительно центра кластера внутри пленки SiO_2 определяет величину барьера эмиттер – кластер (рис. 7). Смещение зонда относительно центра кластера не приводит к прекращению туннелирования электронов, но вызывает увеличение барьера эмиттер – кластер, что определяет изменение вида ВАХ, измеренных даже в пределах одной области повышенной проводимости. Интерпретация ВАХ затрудняется тем, что нет точной информации о расположении кластеров Au относительно границ пленки SiO_2 и их форме. ПЭМ на образцах-спутниках, выращенных на подложках из NaCl, позволяет оценить размер кластера только в плоскости образца и не определяет размер кластера в перпендикулярном направлении. В свою очередь РФЭС не дает информации о точном расположении нанокластеров Au относительно границ слоя SiO_2 .

Таким образом, многообразие форм ВАХ объясняется изменениями толщин барьеров зонд – кластер и кластер – подложка, которые происходят при переходе от кластера к кластеру и определяются положением НК относительно границ слоя SiO_2 , его формой и размером.

Заключение

Предложен способ формирования систем металлических нанокластеров в сверхтонких диэлектрических слоях путем окисления предварительно нанесенного аморфного слоя Au – Si в кислородной плазме тлеющего разряда. Показано, что формирование нанокластеров Au происходит на этапе низкотемпературного окисления смеси Au – Si. Для исследованных тонкопленочных структур $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2\text{:НК-Au/SiO}_2$ средний размер сформированных нанокластеров Au составляет 3 – 5 нм, а расстояние между соседними кластерами ~ 20 нм. Полученные вольт-амперные характеристики контакта металлизированного АСМ зонда к сверхтонким слоям SiO_2 в местах залегания нанокластеров Au позволяют наблюдать явления резонансного туннелирования электронов через дискретные уровни в кластере.

Литература

1. Hanafi H.I., Tiwari S., Khan I. Fast and Long Retention-Time Nano-Crystal Memory. IEEE Transactions on electron devices. 1996, v. 43, no. 9, p. 1553 – 1558.
2. Guo L., Leobandung E., Chou S. Y. A Silicon Single-Electron Transistor Memory Operating at Room Temperature. Science. 1997, v. 275, no. 5300, p. 649 – 651.
3. Yano K., Ishii T., Sano T., Mine T., Murai F., Kure T., Seki K. Status of Single-electron Memories. Electron Devices Meeting. 1998, p. 107 – 110.
4. Yano K., Ishii T., Hashimoto T., Kobayashi T., Murai F., Seki K. Room-temperature Single-electron Memory. IEEE Transactions on Electron Devices. 1994, v. 41, no. 9, p. 1628 – 1638.
5. Guan W., Long S., Jia R., Liu M. Nonvolatile Resistive Switching Memory Utilizing Gold Nanocrystals Embedded in Zirconium Oxide. Applied Physics Letters. 2007, v. 91, no. 6, p. 062111.
6. Ruffino F., De Bastiani R., Grimaldi M.G., Bongiorno C., Giannazzo F., Roccaforte F., Spinella C., Raineri V. Self-organization of Au Nanoclusters on the SiO_2 Surface Induced by 200 keV-Ar⁺ Irradiation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2007, v. 257, no. 1, 2, p. 810 – 814.
7. Ruffino F., Grimaldi M.G. Structural and Electrical Characterization of Gold Nanoclusters in thin SiO_2 Films: Realization of a Nanoscale Tunnel Rectifier. Micro-electronic Engineering. 2007, v. 84, no. 3, p. 532 – 537.
8. Tiwari S., Wahl J.A., Silva H., Rana F., Welsch J.J. Small Silicon Memories: Confinement, Single-electron, and Interface State Considerations. Applied Physics A: Materials Science and Processing. 2000, v. 71, no. 4, p. 403 – 414.
9. Kanjilal A., Hansen J. L., Gaiduk P., Larsen A. N., Cherkashin N., Claverie A., Normand P., Kapelankis E., Skarlatos D., Tsoukalas D. Structural and Electrical Properties of Silicon Dioxide Layers with Embedded Germanium Nanocrystals Grown by Molecular Beam Epitaxy. Applied Physics Letters, 2003, v. 82, no. 8, p. 1212 – 1214.
10. Hochella M. F., Jr., Carim A. H. A Reassessment of Electron Escape Depths in Silicon and Thermally Grown Silicon Dioxide thin Films. Surface Science Letters. 1988, v. 197, no. 3, p. L260 – L268.
11. Лапшина М. А., Филатов Д. О., Антонов Д. А.. Формирование токового изображения при исследовании металлических нанокластеров в диэлектрических пленках методом комбинированной СТМ/АСМ. Поверхность, Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2008, №8, с.1 – 5.
12. Демиковский В.Я., Вугальтер Г.А.. Физика квантовых низкоразмерных структур. М.: Логос, 2000, 247 с.
13. Антонов Д.А., Вугальтер Г.А., Горшков О.Н., Касаткин А.П., Филатов Д.О., Шенина М.Е. Резонансное туннелирование электронов через нанокластеры, сформированные в стабилизированном диоксиде циркония методом ионной имплантации. Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского: Серия “Физика твердого тела”. 2007, №3, с. 55 – 60.

Зенкевич Андрей Владимирович — Московский инженерно-физический институт (государственный университет), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области физики тонких пленок и наноструктур.

Лебединский Юрий Юрьевич — Московский инженерно-физический институт (государственный университет), научный сотрудник. Специалист в области электронной структуры границ раздела, физики поверхности и наноструктур.

Тимофеев Алексей Афанасьевич — Московский инженерно-физический институт (государственный университет), научный сотрудник. Специалист в области просвечивающей электронной микроскопии.

Неволин Владимир Николаевич — Московский инженерно-физический институт (государственный университет), Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской Академии наук, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора ФИРАН. Специалист в области физики тонких пленок и наноструктур.

Антонов Дмитрий Александрович — Научно-Образовательный Центр “Физика твердых наноструктур” Нижегородского Государственного Университета им. Н.И. Лобачевского, младший научный сотрудник. Специалист в области сканирующей зондовой микроскопии.

Филатов Дмитрий Олегович — Научно-Образовательный Центр Сканирующей Зондовой Микроскопии Нижегородского Государственного Университета им. Н.И. Лобачевского, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области электронных и оптических свойств твердых наноструктур.

Максимов Георгий Артурович — Научно-Образовательный Центр Сканирующей Зондовой Микроскопии Нижегородского Государственного Университета им. Н.И. Лобачевского, доктор химических наук, директор. Специалист в области лазерной масс-спектрометрии, электронной спектроскопии.