

УДК 539.121.8.04; 669.14.046

РФЭС ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК TiN_xO_y , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ

А.Н. Стервоєдов, В.М. Береснев

Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины

пл. Свободы, 6, 61022 Харьков, Украина

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

пл. Свободы, 4, 61077 Харьков, Украина

E-mail: asterv@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 15 февраля 2010г.

В работе представлены результаты исследования с использованием метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии наноразмерных пленок TiN_xO_y толщиной ≈ 5 нм, полученных на кремнии методом слаботоочного ионно-лучевого распыления. Показана возможность использования РФЭС с угловым разрешением для определения толщины и сплошности полученных ультратонких пленок. Детально показано влияние температуры подложки во время ионно-лучевого синтеза и температурного отжига на химическое состояние и диффузионные свойства структур Ti-O-N/Si.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наноразмерные пленки, оксинитрид титана, ионное распыление, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, РФЭС.

XPS STUDY OF TiN_xO_y NANOSCALED FILMS, FORMED BY ION BEAM SPUTTER DEPOSITION

A. M. Stervoyedov, V.M. Beresnev

Scientific Centre of Physical Technologies of MES and NAS of Ukraine

Svobody sq.6, 61022 Kharkiv, Ukraine

V.N. Karazin Kharkov national university

Svobody sq. 6, 61077 Kharkiv, Ukraine

The results of studies using X-ray photoelectron spectroscopy of nanoscaled films TiN_xO_y thickness of about 5 nm, obtained on silicon by low-current ion beam sputtering are presented in given work. Also it is shown the possibility of using angle-resolved XPS to determine the thickness and continuity of the obtained ultra-thin films. The effect of substrate temperature during ion beam synthesis and thermal annealing on the chemical state and the diffusion properties of the structures Ti-O-N/Si is shown in details.

KEY WORDS: nanoscaled films, titanium oxinitride, ion beam sputtering, X-ray photoelectron spectroscopy, XPS.

РФЕС ДОСЛІДЖЕННЯ НАНОРОЗМІРНИХ ПЛІВОК TiN_xO_y , ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ІОННО-ПРОМЕНЕВОГО РОЗПИЛЕННЯ

А.М. Стервоєдов, В.М. Береснев

Науковий фізико-технологічний центр МОН і НАН України

пл. Свободи, 6, 61022 Харків, Україна

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

пл. Свободи, 4, 61077 Харків, Україна

У роботі представлені результати дослідження з використанням методу рентгенівської фотоелектронної спектроскопії нанорозмірних плівок TiN_xO_y товщиною ≈ 5 нм, отриманих на кремнії методом слаботоочного іонно-променевого розпилення. Показано можливість використання РФЕС з кутовим дозволом для визначення товщини і суцільності отриманих ультра тонких плівок. Детально показано вплив температури підкладки під час іонно-променевого синтезу та температурного відпалу на хімічний стан і дифузійні властивості структур Ti-O-N/Si.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: нанорозмірні плівки, оксинітрид титану, іонне розпилення, рентгенівська фотоелектронна спектроскопія, РФЕС.

В современных прецизионных технологиях микроэлектроники, микро-электромеханических систем, сенсоров, приборов нанoeлектроники и нанофотоники, активно применяются тонкие слои материалов неорганической и органической природы. Толщины слоев, получаемых разными методами, могут составлять от нескольких атомных монослоев до нескольких сотен нанометров. Методы получения тонких пленок традиционно развиваются по пути сохранения преемственности решений микроэлектроники и путем постепенного снижения толщин слоев, усложнения формы объектов и совершенствования методов контроля качества слоев. Методы, имеющие априори низкие скорости осаждения, что являлось недостатком для серийного микроэлектронного производства до конца прошлого столетия, стали востребованы в связи с преодолением рубежа 0.1 мкм и резким снижением требуемой толщины слоев, а также интенсивным развитием нанотехнологии. С этого времени такие относительно низкоскоростные методы как метод послойного атомного осаждения (ALD) и слаботоочного ионного распыления (LCIBS) [1] получают все большее распространение.

Одним из наиболее перспективных и изучаемых материалов с металлическими свойствами для микро - и нанoeлектроники является нитрид титана TiN. Синтез и исследование пленок TiN проводится для их

использования в качестве диффузионных барьеров при традиционной алюминиевой и медной металлизации, для металлических затворов в КМОП-приборах нового поколения на Si, Ge и GaAs, в качестве избирательных по длине волны оптических пленок в тонкослойных электролюминисцентных дисплеях и других микроэлектронных устройствах [2-5].

Несмотря на достаточно большое количество опубликованных работ по тонким пленкам TiN, имеется ряд нерешенных вопросов, связанных в основном с технологическими трудностями освоения наноразмерного диапазона, где на многие физические и химические свойства накладываются размерные эффекты. Так, например, длина свободного пробега электронов в наноразмерных пленках необходимой толщины уже соизмерима с одним из ее размеров и существенно влияет на электропроводность. При этом температурный коэффициент сопротивления материала пленки может менять знак с отрицательного на положительный. Область гомогенности TiN очень широка ($0,6 < N/Ti < 1,16$), поэтому свойства TiN сильно зависят от количества азота в нитриде [6]. Концентрация азота в TiN сильно влияет на такой важный параметр пленки как удельное сопротивление. На рис. 1 приведена зависимость сопротивления пленки TiN_x от количества азота [7]. Как показано в работе [8], увеличение сопротивления с уменьшением атомов азота может быть связано с рассеянием носителей заряда анионными вакансиями. В отличие от [7], авторами работы [8] наблюдалось более резкое изменение сопротивления в интервале $0,8 < x < 1$ и плавное при $0,67 < x < 0,8$.

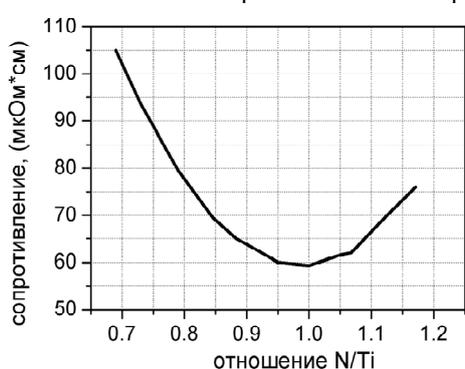


Рис.1. Зависимость сопротивления пленок TiN от количества азота.

При синтезе пленок TiN для использования в качестве диффузионных барьеров контроль стехиометрии также критичен. Так, в работе [9], показано, что дефицит азота в пленках TiN, полученных методом магнетронного напыления, не позволяет их использовать для предотвращения диффузии между кремнием и алюминиевой металлизацией. Отжиг пленок в азоте при температуре 600-700°C способствовал формированию насыщенного азотом слоя TiN, что привело к улучшению качества диффузионного барьера. Низкоэнергетическое ионно-стимулированное осаждение нитридных пленок также приводит к большему насыщению пленок азотом, который может располагаться в междоузлии. Последующий отжиг при этом заставляет избыток азота находить вакантные места в кристаллической решетке или, как конкурирующий процесс, осаждаться на границах зерен.

Свойства нитрида титана чувствительны не только к содержанию азота, но и к примеси кислорода. Контроль содержания кислорода имеет чрезвычайное значение, так как термодинамически формирование оксида титана более благоприятно, чем нитрида, и некоторое количество нежелательного оксида титана формируется даже с небольшим количеством примесного кислорода [10].

В работе [11] исследовалось влияние газовой среды на внедрение кислорода в пленки TiN, синтезируемые методом реактивного магнетронного распыления. Как было показано авторами, содержание кислорода в пленках, полученных при остаточном давлении кислорода $3 \cdot 10^{-4}$ Па, составляло 20 ат. %. Т.е. уровень остаточного давления 10^{-4} Па не достаточен для формирования высококачественных пленок TiN, свободных от содержания кислорода.

Другим источником поступления кислорода в пленки является газ (азот, аргон), который используется при получении пленок TiN реактивным испарением, ионно-плазменными или ионно-лучевыми методами. В работе [10] было показано, что, как в азоте, так и в аргоне высокой чистоты (99,999%), который авторы использовали для получения пленок нитрида титана магнетронным распылением, парциальное давление кислорода составляло порядка 10^{-5} атм, что больше верхней границы фазовой стабильности TiN. Методом РФЭС было выявлено содержание оксида титана в полученных образцах. В работе [12], в которой проводились аналогичные исследования, было показано, что к уменьшению содержания кислорода в пленках TiN, получаемых методом магнетронного распыления, приводит прикладывание отрицательного потенциала к подложке и утверждается, что дополнительная ионная бомбардировка, возникающая при этом, приводит к улучшению характеристик получаемых пленок. Эффективность использования ионной бомбардировки для синтеза пленок нитрида титана также показана в работах [13, 14].

В работе [15] также исследовалось влияние остаточной атмосферы и чистоты напускаемого азота на содержание кислорода в пленках нитрида титана. Для этого методами РБС и Оже-электронной спектроскопии исследовались пленки, полученные методом импульсного лазерного осаждения с использованием мишеней Ti и TiN, чистотой не менее 99,5%. Авторами показано, что при осаждении в остаточном давлении в камере $2 \cdot 10^{-6}$ мбар внедрение кислорода в пленку титана составляет $3,6 \cdot 10^{13}$ атомов в секунду. При напуске азота чистотой 99,99% происходило дополнительное окисление пленки.

Присутствие кислорода в пленках нитрида титана влияет на множество свойств, включая проводимость, твердость, адгезию, диффузионную активность [9, 16-19]. Так в работе [16] показано, что диффузия атомов кремния в TiN ускоренно проходит по границе оксидированных зерен. Т.е., большее содержание кислорода в

пленке TiN увеличивает коэффициент диффузии. Аналогичные результаты были получены в работе [18], где исследовалась диффузия атомов меди и алюминия в TiN.

Если для применения пленок нитрида титана в качестве контактов и диффузионных барьеров в микро- и нанoeлектронике присутствие кислорода критично и существенно ухудшает параметры пленок, то для некоторых применений наоборот, присутствие кислорода в TiN с контролируемым отношением N/O приводит к многообещающему функциональному диапазону материалов TiN_xO_y . Пленки оксинитридов титана различной стехиометрии находят свое применение, например, в качестве оптически селективных поглотителей, прозрачных окон для инфракрасных датчиков, тонкопленочных сопротивлений [20, 21].

Также нерешенными в полной мере актуальными задачами являются задачи о реальной толщине и сплошности синтезируемых ультратонких пленок TiN. К сожалению, эти задачи плохо решаются методами многозондового измерения электросопротивления и даже методами электронной микроскопии. В последнем случае практически невозможно организовать измерения *in situ* и исследовать в динамике рост синтезируемых пленок. Исследование методами туннельной сканирующей микроскопии или атомно-силовой микроскопии также не всегда достаточно информативны. Поэтому для проведения исследований параметров TiN пленок была выбрана рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), как один из самых чувствительных и информативных методов. Целью данной работы являлось РФЭС исследование наноразмерных TiN и TiN_xO_y пленок, в частности, изучение их стехиометрического состава в зависимости от температурных условий роста и последующего отжига, определение толщины и сплошности пленок в едином вакуумном цикле синтеза и измерения параметров

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Методом ионно-лучевого распыления титановой мишени в атмосфере азота [1] были получены пленки Ti-O-N толщиной 3-5 нм. Подложкой для осаждения был выбран кремний, предварительно очищенный ионным пучком. Перед осаждением мишень также очищалась распылением ионным пучком в течении 15 мин. Титан распылялся ионами аргона с энергией 5 кэВ и током на мишени 10 мкА при диаметре ионного пучка 10 мм. Вакуум в подготовительной камере создавался турбомолекулярным насосом и до включения ионного источника составлял $4 \cdot 10^{-8}$ мбар. При включении источника ионов, вследствие напуска газа в его разрядную камеру, вакуум в рабочей камере ухудшался за счет аргона до $5 \cdot 10^{-6}$ мбар. Для получения нитрида титана после запуска ионного источника в камеру напускался азот со степенью чистоты 99,999%. Время осаждения составляло 10 минут. Был получен ряд образцов как с включенным режимом стабилизации температуры подложки во время синтеза на уровне 350°C, так и без дополнительного подогрева подложки. Для исследования влияния температурного отжига на стехиометрический состав проводился отжиг образцов в вакууме при температуре 650°C и 750°C пропуском постоянного электрического тока через образец.

Для анализа образцы транспортировались без развакуумирования установки в измерительную камеру для исследования методом РФЭС. Вакуум в измерительной камере во время регистрации спектров составлял $5 \cdot 10^{-10}$ мбар. Спектры снимались с использованием рентгеновского излучения Mg-K α (1253,6 эВ). Перед исследованием полученных пленок спектрометр РФЭС тестировался на золотом образце по положению пиков фотоэмиссии с основного уровня 4f золота.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определение толщины наноразмерных пленок TiN методом РФЭС

Толщина диффузионно-барьерной, затворной или контактной тонкой пленки является одним из основных параметров. Стандартные методы прямого измерения толщины, заключающиеся в измерении особенностей поперечных сечений и определении разности высот между границами пленка-подложка и пленка поверхность или пленка-пленка в случае многослойных структур, сложно реализовать в случае слоев наноразмерной толщины. Кроме того, на точность положения границ на сечении влияет шероховатость переходных областей [22]. Неравномерность заполнения впадин и выступов исходного рельефа на начальном этапе осаждения пленки вносит неопределенность в расчеты толщины в нанометровом диапазоне определения ее косвенными методами, например, по кривой зависимости толщины от времени, полученной для более толстых пленок. Поэтому, для измерений синтезируемых ультратонких пленок, толщина которых не превышает несколько нанометров, было предложено использовать метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии [23, 24]. Суть измерений заключается в следующем: когда поверхность образца покрыта одним или несколькими тонкими слоями и суммарная толщина слоев меньше, чем максимальная глубина РФЭС анализа, стехиометрический состав слоев известен, то толщина слоев может быть вычислена по изменению интенсивности фотоэлектронов с различных энергетических уровней. В случае, когда на поверхность подложки наносится ультратонкая пленка известного состава, то изменение интенсивности пика фотоэмиссии электронов с подложки определяется простым выражением:

$$I = I_0 e^{-\frac{d}{\lambda \cos \theta}}, \quad (1)$$

откуда получаем толщину пленки:

$$d = \lambda \cos \theta \ln \frac{I_0}{I} \tag{2}$$

Здесь I_0 и I – интенсивности (площади) пиков фотоэмиссии с уровня 2p кремния соответственно до и после осаждения пленки, d – толщина пленки, λ – неупругая длина свободного пробега электронов в пленке, θ – угол анализа фотоэлектронов относительно нормали к поверхности. На рис. 2 показаны соответствующие для определения отношения интенсивностей пики из снятого в эксперименте фотоэлектронного спектра.

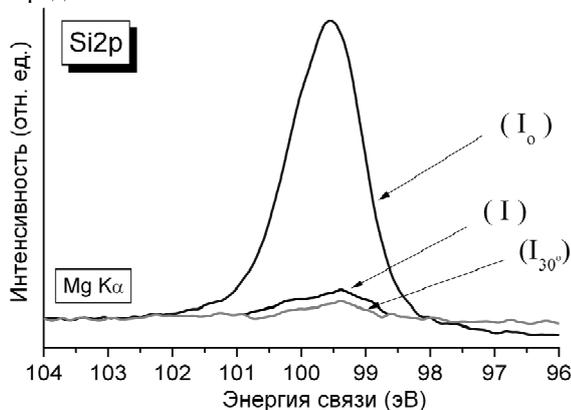


Рис.2. Изменение интенсивности пика фотоэмиссии с уровня 2p кремния до осаждения пленки (I_0), после (I) при повороте образца на 30° (I_{30}).

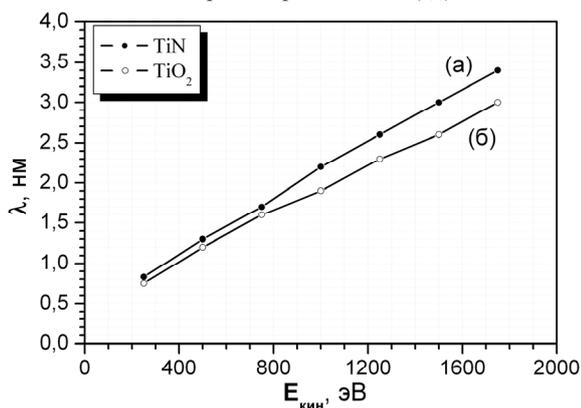


Рис.3. Графики зависимости расчетной неупругой длины свободного пробега электронов λ в пленке TiN (а) и TiO_2 (б) согласно формуле (3).

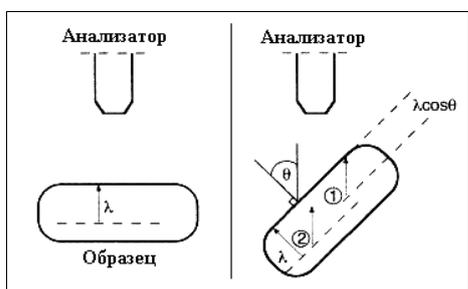


Рис.4. Изменение глубины анализа в РФЭС при повороте образца на угол θ относительно входной апертуры анализатора.

выхода фотоэлектронов становится равной $\lambda \cos \theta$, что, естественно, меньше λ . Таким образом, фотоэлектронам с атомов в плоскости 2 и ниже необходимо пройти расстояние больше, чем длина затухания, и менее вероятно, что они будут детектированы анализатором, в отличие от тех, которые находятся в плоскости 1 и выше [26]. На рис. 2 показано изменение интенсивности фотоэмиссии с уровня 2p кремния при снятии РФЭС спектра образца, повернутого на 30° . Уменьшение составляет примерно 30% по отношению к нормальной геометрии и с высокой точностью соответствует рассчитанному уменьшению интенсивности, что подтверждает сплошность образованной пленки.

Для вычисления неупругой длины свободного пробега электронов λ воспользуемся формулой, предложенной авторами Tanuma, Powell и Penn [25], где λ является функцией кинетической энергии электрона (E) и параметров, характеризующих вещество:

$$\lambda = \frac{E}{E_p^2 [\beta \ln(\gamma E) - (C/E) + (D/E^2)]} \tag{3}$$

где:

$$E_p = 28,8(N_v \rho / M)^{1/2},$$

$$\beta = -0,10 + 0,944 / (E_p^2 + E_g^2)^{1/2} + 0,069 \rho^{0,1},$$

$$\gamma = 0,191 \rho^{-0,50}, C = 1,97 - 0,91U, D = 53,4 - 20,8U,$$

$$U = N_v \rho / M = E_p^2 / 829,4,$$

ρ – плотность ($г \cdot см^{-3}$), N_v – количество валентных электронов в атоме или молекуле, M – молекулярный вес, E_g – ширина запрещенной зоны (эВ).

График зависимости неупругой длины свободного пробега от кинетической энергии электронов для нитрида и оксида титана, рассчитанной по формуле (3), приведен на рис. 3. В нашем случае, когда кинетическая энергия равна кинетической энергии фотоэлектронов, эмитированных с основного уровня 2p кремния, неупругая длина свободного пробега электронов в нитриде титана составляет: $\lambda \approx 2.15$ нм.

В результате вычислений площади пиков фотоэмиссии с уровня 2p кремния до и после осаждения пленки и подстановки результатов в формулу (2), толщина TiN пленки составила 4,5 нм. Цифры измерений толщины пленки РФЭС методом с высокой точностью совпадают с цифрами проводимых измерений в процессе осаждения пленки при помощи предварительно откалиброванного кварцевого измерителя толщины.

Для определения сплошности пленки или неравномерности напыленного слоя РФЭС спектры снимались под различными углами. На рис. 4 схематично показано, как зависит глубина анализа РФЭС от расположения анализатора относительно образца (угла θ). При нормальном расположении ($\theta = 0^\circ$) глубина выхода равна длине затухания (λ). Эта геометрия обеспечивает максимальную глубину анализа. При повороте образца на угол θ ($\theta < 90^\circ$) относительно входной апертуры анализатора, глубина

Влияние температуры роста на стехиометрический состав наноразмерных структур Ti-O-N/Si

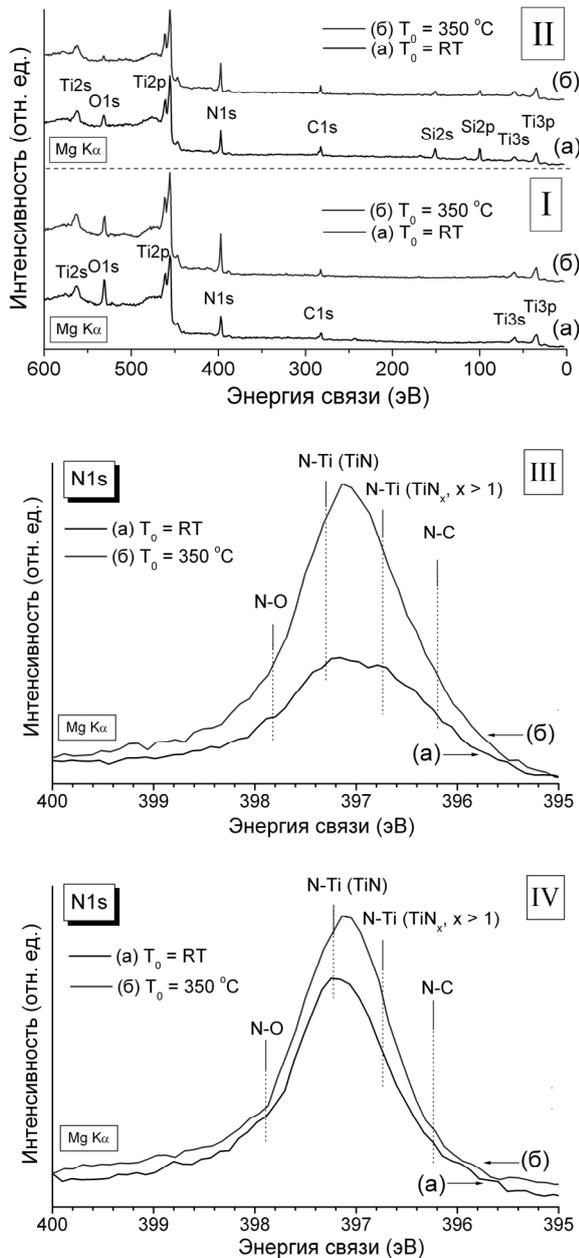


Рис. 5. РФЭС спектры поверхности образцов Ti-O-N: (I) – обзорные спектры; (II) – обзорные спектры после отжига при 750°C; (III) – детальные спектры фотоэмиссии с остоного уровня 1s азота до отжига; (IV) – детальные спектры фотоэмиссии с остоного уровня 1s азота после отжига при 750°C; а - образцы, полученные при комнатной температуре; б - при температуре подложки 350 °С.

связано с тем, что коэффициент диффузии атомов кремния в TiN увеличивается с увеличением содержания примесей кислорода в пленке, как было показано в работе [16].

ВЫВОДЫ

Представлены результаты исследования методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии наноразмерных пленок TiN_xO_y толщиной ≈ 5 нм, полученных осаждением на кремнии титана, распыляемого в атмосфере азота слаботочным ионным пучком аргона. Показана возможность использования РФЭС с угловым разрешением для определения *in situ* толщины и сплошности полученных пленок. Детально изучено влияние температуры подложки во время ионно-лучевого синтеза и температурного отжига на химическое состояние и

Для исследования влияния температуры роста на химическое состояние и диффузионные свойства структур Ti-O-N/Si был получен ряд образцов как с включенным режимом стабилизации температуры подложки во время синтеза на уровне 350°C, так и без дополнительного подогрева подложки. Сравнение обзорных РФЭС спектров, представленных на рис. 5.I, 5.II, а также детальных спектров фотоэмиссии с остоного уровня 1s азота (рис. 5.III и 5.IV) показывает, что в первом случае (при 350°C) наблюдается большее содержание азота и меньше кислорода, чем в пленках, полученных при комнатной температуре. Кроме этого, анализ спектров фотоэмиссии с уровня 1s азота (рис. 5.III) показывает, что при температуре роста $T_p=350^\circ\text{C}$ наблюдается больше стехиометрического TiN с насыщенными связями азота с титаном. После температурного отжига при 750°C оксидная составляющая в пленках, полученных при комнатной температуре, существенно уменьшается, но заметнее, чем в пленках, сформированных при 350°C, где она практически полностью исчезает. Изменение стехиометрического состава образцов, полученных при разных температурах подложки, во время температурного отжига наглядно показано на рис. 6, где представлена тройная диаграмма стехиометрического состава образцов. Диаграмма построена по результатам анализа спектров фотоэмиссии с уровнями 2p титана, 1s азота и 1s кислорода с учетом фактора элементной чувствительности.

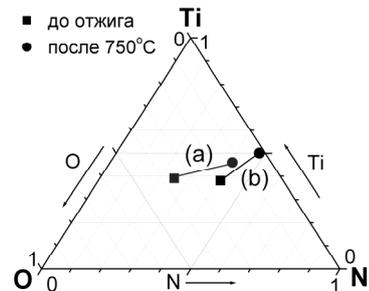


Рис. 6. Тройная диаграмма стехиометрического состава образцов Ti-O-N до и после температурного отжига. а - образцы, полученные при комнатной температуре; б - при температуре подложки 350 °С..

Сравнение обзорных спектров после отжига при 750°C, приведенных на рис. 5.II показывает более существенную диффузию атомов кремния в пленках, полученных при комнатной температуре подложки во время синтеза. Данное обстоятельство

диффузионные свойства структур Ti-O-N/Si. Показано, что после осаждения в пленках, сформированных при температуре роста 350°C, наблюдается большее содержание азота и меньше кислорода, чем в пленках, полученных без дополнительного нагрева подложки. После температурного отжига при 750°C оксидная составляющая в пленках, полученных при низкой температуре роста, значительно уменьшается, но остается заметной по сравнению с пленками, сформированными при 350°C. Исследования границы раздела пленка-подложка после отжига при 750°C показывают более существенную диффузию атомов кремния в пленках с большим содержанием кислорода. Одним из факторов, влияющих на изменение химического состава пленок после отжига, возможно, является формирование разного количества насыщенных и ненасыщенных связей атомов азота и титана при разных температурах роста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Styerovoyedov, V. Farenik. Formation of Ti and TiN ultra-thin films on Si by ion beam sputter deposition // *Surface Science.* – 2006. – Vol. 600. – P. 3766–3769.
2. S.K. Rha, W.J. Lee, S.Y. Lee, Y.S. Hwang et al. Improved TiN film as a diffusion barrier between copper and silicon // *Thin Solid Films.* - 1998. – Vol. 320 - P. 134-140.
3. Alberti A., Molinaro S., La Via F., Bongiorno C., Ceriola G., Ravesi S. Correlation between microstructure control, density and diffusion barrier properties of TiN(O) films // *Microelectronic Engineering.* - 2002. – № 60. – P. 81-87.
4. Y.H. Shin, Y. Shimogaki. Diffusion barrier property of TiN and TiN/Al/TiN films deposited with FMCVD for Cu interconnection in ULSI // *Science and Technology of Advanced Materials.* - 2004. – №5. – P. 399-405.
5. Lee W.H., Kuo Y.L., Huang H.J., Lee C. Effect of density on the diffusion barrier property of TiNx films between Cu and Si // *Materials Chemistry and Physics.* - 2004. – №85. – P.444-449.
6. Б.У. Асанов, В.П. Макаров. Нитридные покрытия, полученные вакуумно-дуговым осаждением // *Вестник КРСУ.* - 2002. – №2. – С. 45–51.
7. Ji Hoon Kang, Kwang Joo Kim. Structural, optical, and electronic properties of cubic TiNx compounds // *Journal of Applied Physics.* - 1999. – Vol. 86. – №1. – P.346-350.
8. Katsuhiro Yokota, Kazuhiro Nakamura, Tomohiko Kasuya, Katsuhisa Mukai, Masami Ohnishi. Sensitivities of titanium nitride films prepared onto silicon by an ion beam assisted deposition method // *Journal of Physics D: Applied Physics.* - 2004. – Vol. 37. – P. 1095-1101.
9. H. Joswig, W. Pamler. Stoichiometry effects in TiN diffusion barriers // *Thin Solid Films.* - 1992. – Vol. 221. – P.228-232.
10. Fu-Hsing Lu, Hong-Ying Chen. XPS analyses of TiN films on Cu substrates after annealing in the controlled atmosphere // *Thin Solid Films.* - 1999. – Vol. 355-356. – P.374-379.
11. Takeo Nakano, Kenichiroh Hoshi, Shigeru Baba. Effect of background gas environment on oxygen incorporation in TiN films deposited using UHV reactive magnetron sputtering // *Vacuum.* - 2009. – Vol. 83. – P. 467-469.
12. Jouan P.Y., Peignon M.C., Cardinaud Ch., Lempri G. Characterisation of TiN coatings and of the TiN/Si interface by X-ray photoelectron spectroscopy and Auger electron spectroscopy // *Applied Surface Science.* - 1993. – Vol. 68. – P. 595-603.
13. K. Yokota, T. Kasuya, K. Nakamura, M. Ohnishi, F. Miyashita. Ion beam current dependence of compositions and resistivities on titanium nitride films deposited onto silicon by an ion beam assisted deposition method // *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research.* - 2006. – № 242 (1). – P.390-392.
14. K. Yokota, K. Nakamura, T. Kasuya, M. Ohnishi. Phase composition and crystalline structure of titanium nitride deposited on silicon by an ion-beam assisted deposition technique // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* - 2003. – №206. – P. 386-389.
15. Kools J. C. S, Nillesen C. J. M., Brongersma S. H., E. van de Riet, Dieleman J. Laser ablation deposition of TiN films // *J. Vac. Sci. Technol.* - 1992. – Vol. 10(4). – P.1809-1812.
16. L. Hultman. Thermal stability of nitride thin films // *Vacuum.* - 2000. – №5(1). – P.1-30.
17. Yin P., Maruno S. Bias Effect on the Microstructure and Diffusion Barrier Capability of Sputtered TiN and TiOxNy Films // *Jpn. J. Appl. Phys.* - 1992. – № 31(5A). – P. 1446- 1452.
18. Y. S. Gong, Jing-Cheng Lin, Chiapyng Lee. Interdiffusion and reactions in the Cu/TiN/Si thin film system // *Applied Surface Science.* - 1996. – Vol. 92(2). – P. 335-339.
19. N. Kumar, K. Pourrezaei, B. Lee, E. C. Douglas. Failure mechanisms of TiN thin films diffusion barriers // *Thin Solid Films.* - 1988. – Vol.164. – P. 417-428.
20. C. Nunes, V. Teixeira, M. L. Prates, N. P. Barradas, A. D. Sequeira. Graded selective coatings based on chromium and titanium oxynitride // *Thin Solid Films.* - 2003. – Vol. 442. – P. 173-178.
21. Nguyen Duy Cuong, Dong-Jin Kim, Byoung-Don Kang, Chang Soo Kim, Soon-Gil Yoon. Characterizations of high resistivity TiNxOy thin films for applications in thin film resistors // *Microelectronics Reliability.* - 2007. – Vol. 47. – Issues 4-5. – P. 752-754.
22. А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, О.М. Стукалов. Метод контроля наноразмерной толщины бислоиных пленочных наноструктур // *Письма в ЖТФ.* - 2003. – Т. 29. - Вып. 4. – С. 39–48.
23. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. – Пер. с англ. под ред. Д. Бриггса и М.П. Сиха. – М.: Мир, 1987. – 600 с.
24. Д. Вудраф, Т. Делчар. Современные методы исследования поверхности. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 564 с.
25. S. Tanuma, C.J. Powell, D.R. Penn. Calculations of Electron Inelastic Mean Free Paths // *Surface & Interface Analysis.* – 1991. – Vol. 17. – P. 911-926.
26. R. L. Opila, Joseph Eng Jr. Thin films and interfaces in microelectronics: composition and chemistry as function of depth // *Progress in Surface Science.* - 2002. – Vol. 69. – P. 125-163.