

05;06;11;12

©1993 г.

ЭЛЕКТРОННО-СТИМУЛИРОВАННАЯ НИТРИДИЗАЦИЯ Si(100) В АТМОСФЕРЕ АММИАКА

С.Л.Тарасова, В.Г.Котляр, А.А.Саранин, Е.А.Храмцова, В.Г.Лифшиц

Введение

Нитрид кремния — один из важнейших материалов для полупроводникового производства. Технологические процессы его получения требуют повышенных температур, что нежелательно из-за одновременной активизации побочных эффектов, таких как диффузия примеси. Поэтому особое значение приобретает поиск низкотемпературных способов получения нитрида кремния.

Взаимодействие азотосодержащих газов с поверхностью Si(100) при низких температурах изучено с помощью методов исследования [1–13]. Известно, что аммиак диссоциативно адсорбируется на поверхности Si. Хотя природа продуктов диссоциации долгое время оставалась невыясненной, было установлено с помощью ряда методов [8,11–13], что при диссоциативной адсорбции образуются SiNH₂ и SiH. Диссоциация аммиака происходит под влиянием оборванных связей (ненасыщенных валентностей) приповерхностных атомов кремния не только при комнатной температуре, но даже значительно ниже (100 К [7]). Наличие таких оборванных связей (двух для каждого атома Si в случае нереконструированной поверхности Si(100) и одной для димерной модели (2 × 1)) обеспечивает полупроводниковой поверхности высокую реакционную способность. Однако пассивация таких связей водородом при диссоциативной адсорбции молекул аммиака делает поверхность кремния неактивной к дальнейшему химическому взаимодействию и ограничивает рост нитридной пленки до субмикронных толщин. Восстановление активности кремния возможно путем термической десорбции водорода [10,13] или под воздействием электронного облучения [6].

Стимулирующее воздействие электронного облучения на процесс нитридации кремния исследовали в работах [2,3]. В [1] авторы сравнивали начальные стадии высокотемпературной нитридации Si(100) аммиаком с ростом тонких пленок нитрида кремния при комнатной температуре

(КТ), вызванным воздействием пучка электронов. Найдено, что скорость роста, очень низкая при КТ, увеличивается под электронным облучением и становится сравнимой со скоростью термической реакции. Такое воздействие электронов объясняется стимулированием диссоциации аммиака на поверхности. Показано, что скорость формирования первого слоя нитрида кремния пропорциональна давлению аммиака в диапазоне давлений $10^{-5} - 10^{-7}$ Тор.

В настоящей работе методом электронной оже-спектроскопии (ЭОС) в условиях сверхвысокого вакуума изучена кинетика реакции взаимодействия аммиака с поверхностью Si(100) под влиянием электронного облучения. Определены зависимости скорости процесса от давления газа в диапазоне $10^{-7} - 10^{-9}$ Тор, а также от плотности электронного пучка. Исследовано влияние высокотемпературного отжига на состав и качество полученных пленок нитрида кремния. Предложена феноменологическая модель процесса электронно-стимулированной нитридации, которая хорошо описывает полученные экспериментальные закономерности.

1. Экспериментальная часть

Исследования проводили в сверхвысоковакуумной (СВВ) установке с базовым давлением $8 \cdot 10^{-10}$ Тор. Контроль химического состава поверхности осуществлялся при помощи ЭОС. В качестве образцов применяли пластины Si(100) толщиной 0.3 мм, легированные фосфором, с удельным сопротивлением 7.5 Ом·см. Атомарно чистую поверхность получали высокотемпературным прогревом в сверхвысоком вакууме ($1250-1300^\circ$ в течение 5 мин), после чего ЭОС показывала отсутствие химических примесей на поверхности. Для нитридации использовали химически чистый аммиак, который напускали в камеру через цельнометаллический натекатель. Давление аммиака изменяли в диапазоне $10^{-8} - 10^{-6}$ Тор, а плотность электронного тока — в диапазоне $5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$ А/см², что соответствовало току на образце от $0.2 \cdot 10^{-6}$ до $2.2 \cdot 10^{-6}$ А. Для облучения реакционной области образца и регистрации ее оже-спектров применяли непосредственно пушку оже-спектрометра. Плотность тока в пучке определяли по измерениям интегрального тока на цилиндре Фарадея. Энергия первичного пучка электронов (E_p) составляла 2500 эВ при диаметре пучка ≈ 75 мкм. Были выполнены эксперименты трех видов. Методика выполнения заключалась в следующем: а) при проведении нитридации в условиях больших давлений аммиака ($10^{-7} - 10^{-6}$ Тор) сначала напускали аммиак до нужного давления в камере, затем поворачивали образец к электронной пушке оже-спектра и начинали отсчет времени облучения при одновременной непрерывной регистрации оже-спектров с помощью однокоординатного самописца; б) при проведении нитридации в условиях меньших давлений аммиака ($10^{-8} - 10^{-7}$ Тор) напуск газа производился при практически одновременном отсчете начала процесса нитридации и регистрации и не требовал манипуляции образцом; в) в экспериментах по так называемой “ступенчатой нитридации”, предварительно очищенный образец экспонировался в аммиаке заведомо достаточной для насыщения адсорбции дозой [2] в 20 L ($1L = 10^{-6}$ Тор·с), затем NH₃ откачивался до момента установления исходного базового давления и образец подвергался облучению электронами до “насыщения”, после чего цикл повторялся.

2. Результаты и обсуждение

а) Оже-спектры поверхности образца при электронном облучении в атмосфере NH_3 . Во всех экспериментах при экспозиции поверхности Si (100) в аммиаке под воздействием электронного облучения наблюдается одинаковая последовательность изменения характера оже-спектров. Интенсивность оже-пика Si-LVV (91.5 эВ), который соответствует непрореагировавшему кремнию, уменьшается со временем экспозиции, а положение его постепенно сдвигается от 91.5 до 90 эВ. В то же самое время наблюдаются появление и рост двух новых пиков: N-KLL оже-пика азота (379 эВ) и Si-LVV оже-пика (84 эВ) нитрида кремния Si_3N_4 [14], сформированного на поверхности образца. По мере увеличения экспозиции оже-пики N-KLL (379 эВ) и Si-LVV (84 эВ) достигают величины насыщения. Отметим, что исходный оже-пик Si-LVV (91.5 эВ), положение которого сдвигается в процессе роста нитрида до значения 90 эВ, полностью не исчезает. Это может быть связано с присутствием чистого кремния на поверхности или с наложением сигнала от подложки, вызванным конечной толщиной формирующего слоя.

Приведенные данные показывают, что в результате электронного облучения в атмосфере аммиака при КТ на поверхности Si (100) формируется нитрид кремния Si_3N_4 .

б) Влияние давления аммиака на скорость электронно-стимулированной нитридации. На рис. 1, а приведены экспериментальные зависимости толщин формирующегося слоя нитрида кремния от времени процесса при различных значениях давления аммиака ($0.5 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-6}$ Тор) и постоянном токе на образце ($I = 1.2 \cdot 10^{-6}$ А).

Предполагая послойный механизм роста и стехиометричность состава образующегося нитрида кремния, толщину пленки определяли, исполь-

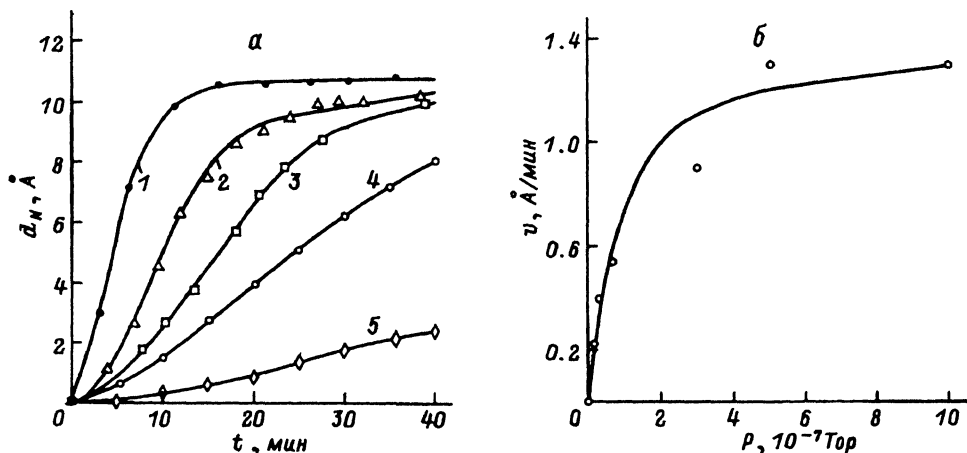


Рис. 1. Влияние экспозиции на толщину нитридной пленки при постоянном токе облучения ($I = 1.2 \cdot 10^{-6}$ А) и различных давлениях аммиака (а) и изменение скорости электронно-стимулированной нитридации в зависимости от давления аммиака при постоянном токе облучения (б).

а: 1 — $1 \cdot 10^{-6}$, 2 — $7 \cdot 10^{-8}$, 3 — $3 \cdot 10^{-8}$, 4 — $1.5 \cdot 10^{-8}$, 5 — $4.6 \cdot 10^{-9}$ Тор.

зую следующие соотношения [15]:

$$I_{Si} = I_{Si}^{\infty} \exp(-d/\lambda_{Si} \cdot \cos \varphi),$$

$$I_{Si_3N_4} = I_{Si_3N_4}^{\infty} (1 - \exp(-d/\lambda_{Si} \cos \varphi)),$$

$$I_N = I_N^{\infty} (1 - \exp(-d/\lambda_N \cdot \cos \varphi)),$$

где I_{Si}^{∞} — интенсивность сигнала от полубесконечного образца кремния; $I_{Si_3N_4}^{\infty}$ и I_N^{∞} интенсивности сигналов кремния и азота соответственно от полубесконечного образца нитрида кремния; I_{Si} , $I_{Si_3N_4}$ и I_N — интенсивности сигналов непрореагировавшего кремния, прореагировавшего кремния и азота соответственно, для системы пленка нитрида кремния на кремнии; d — толщина пленки нитрида кремния; λ_{Si} — длина свободного пробега для электронов с энергией 91.5 эВ, равная 5.5 Å; λ_N — длина свободного пробега для электронов с энергией 379 эВ ($N-KLL$), равная 11 Å. Амплитуды пиков 91.5 и 84 эВ измеряли, разделяя их на ЭВМ. Как видно из рис. 1, а, кривые зависимостей имеют S -образный характер для давлений, не превышающих $\approx 3 \cdot 10^{-7}$ Тор. Изменение толщины растущей пленки, более медленное в начале процесса, со временем увеличивается и, начиная с некоторого момента, тем раньше, чем больше давление, практически перестает изменяться, выходя на насыщение. Для давлений, превышающих $3 \cdot 10^{-7}$ Тор, кинетические кривые практически совпадают и не имеют S -образного характера на начальном участке. Скорость реакции нитридации определяли по наклону кривых (рис. 1 а) на линейном участке изменения толщины во времени. На рис. 1, б показана зависимость скорости процесса нитридации от различных давлений аммиака. Линейно возрастая в диапазоне $0.5 - 3 \cdot 10^{-8}$ Тор, скорость нитридации затем замедляется и после достижения максимального значения примерно при $P = 5 \cdot 10^{-7}$ Тор перестает изменяться с дальнейшим увеличением давления.

в) Влияние различных плотностей тока на скорость электронно-стимулированной нитридации. Экспериментальные результаты по исследованию влияния электронного облучения при постоянном давлении аммиака ($P = 7 \cdot 10^{-8}$ Тор) в зависимости от плотности тока на образце представлены на рис. 2, а как изменение толщины растущей пленки от времени экспозиции в аммиаке. Как видно из рисунка, чем выше плотность электронного пучка, тем с большей скоростью увеличивается толщина нитридной пленки, а время выхода кривых на уровень насыщения уменьшается. Данные по изменению скорости нитридации под воздействием различных плотностей тока приведены на рис. 2 б. В данном диапазоне наблюдается линейная зависимость. Таким образом, приведенные экспериментальные зависимости показывают, что плотность электронного пучка играет такую же существенную роль, как и давление аммиака в камере.

г) “Ступенчатая” нитридизация поверхности Si (100). Для выяснения механизма электронно-стимулирующего влияния на реакцию взаимодействия Si (100) с NH_3 был выполнен эксперимент по “ступенчатой” нитридации, в котором, согласно методике, описанной в разделе 1, образец предварительно экспонировался в аммиаке, а затем, после того как NH_3 был откачан из камеры до давления $P \approx 10^{-9}$ Тор,

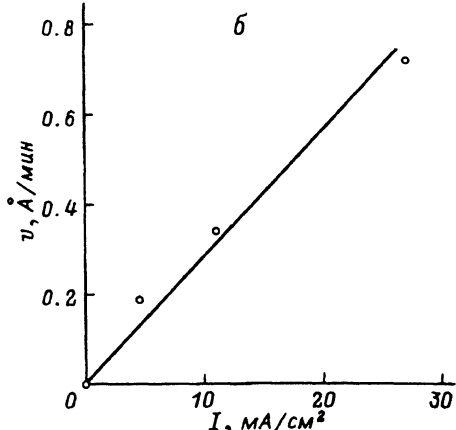
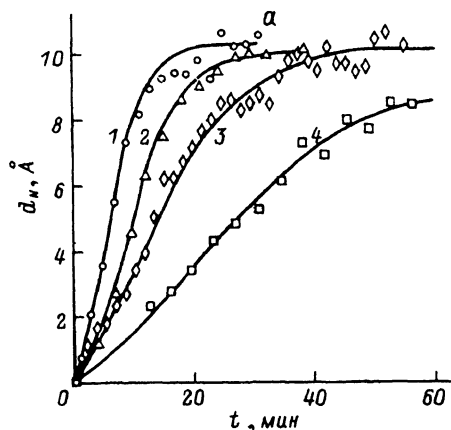


Рис. 2. Влияние экспозиции на толщину нитридной пленки при постоянном давлении аммиака ($P = 7 \cdot 10^{-8}$ Тор) и различных плотностях электронного пучка (а) и изменение скорости электронно-стимулированной нитридации в зависимости от плотности электронного пучка при постоянном давлении аммиака (б).

а: 1 — $50 \cdot 10^{-3}$, 2 — $27 \cdot 10^{-3}$, 3 — $11 \cdot 10^{-3}$, 4 — $4.5 \cdot 10^{-3}$ А/см².

его подвергали облучению потоком электронов. Такой цикл обработки был повторен многократно. На рис. 3 показано изменение толщины образующегося слоя нитрида кремния в зависимости от числа экспериментальных циклов. Как видно из рис.3, с каждым циклом слой Si_3N_4 увеличивается на $\sim 0.6 \text{ \AA}$, а изменение толщины пленки представляет собой линейную зависимость от количества выполненных циклов. Поскольку электронное облучение включалось после того, как реагирующий газ был откачан из камеры, то, следовательно, лишь адсорбированные кремниевой поверхностью молекулы аммиака участвовали в последующей реакции нитридации. При этом, по-видимому, каждый раз электронным пучком активизировались примерно равные количества оборванных кремниевых связей для последующего химического взаимодействия с адсорбированными молекулами аммиака, что и приводило к увеличению толщины растущей пленки на примерно равное значение в каждом выполненном цикле. Таким образом, экспериментальные данные показывают,

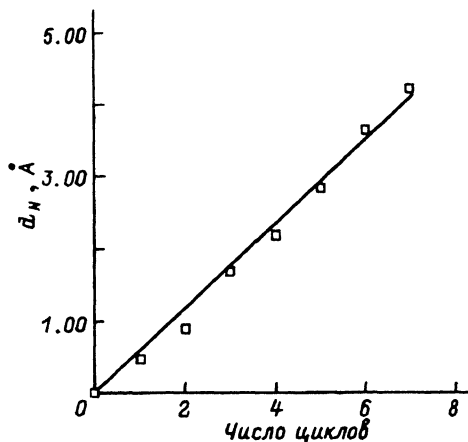


Рис. 3. Зависимость толщины формирующегося слоя нитрида кремния от числа циклов "ступенчатой" нитридации.

что в отсутствие аммиака в газовой фазе электронное облучение оказывает стимулирующее воздействие на процесс нитридации, происходящий непосредственно не поверхности кремния.

д) Влияние высокотемпературного отжига на состав нитридного слоя в области зоны облучения. Пленку нитрида кремния, полученную при взаимодействии Si (100) с NH_3 при одновременном облучении пучком электронов, развернутым в растр, подвергали отжигу в диапазоне температур от 750 до 1120° С. Данные оже-спектроскопии поверхности нитридного слоя после каждой ступени отжига показали отсутствие изменений химического состава пленки. На рис. 4 представлен профиль отожженной пленки, отсчитанный от ее середины и полученный по результатам оже-анализа. В диапазоне температур от КТ до 1000° С не происходит никаких существенных изменений профиля нитридного пятна. При температуре 1020° С первоначальная толщина нитридного слоя уменьшается с 10 до 8 Å, а равномерность распределения нитрида в области пятна остается практически неизменной. Последующий отжиг в течение 1 мин при 1120° уменьшает толщину пленки до ~ 4 Å, а при больших временах отжига приводит к полной десорбции. Полученные данные показывают, что в результате отжига в интервале температур от 750 до 1120° не происходит нарушения химического состава и однородности нитрида кремния. Оже-спектры пленки, полученной электронно-стимулированной нитридацией, и результаты высокотемпературного отжига позволяют считать качество нитрида кремния таким же, как и полученного прямой термической нитридацией поверхности кремния в аммиаке [16].

е) Феноменологическая модель процесса электронно-стимулированной нитридации. Рассмотрим адсорбцию аммиака на поверхности кремния под воздействием электронного облучения, полагая, что на поверхности одновременно происходят три процесса: адсорбция, десорбция и реакция аммиака с поверхностью кремния с образованием нитрида кремния, обусловленная присутствием электронного облучения. Предположим, что на поверхности имеется определенное число мест адсорбции S , часть которых S_1 занята адсорбированными молекулами, а часть $S_0 = S - S_1$ — свободна. Скорость адсорбции молекул газа v_a пропорциональна числу свободных

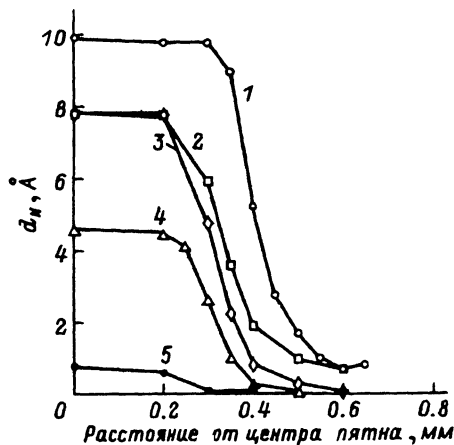


Рис. 4. Профиль нитридного пятна, отсчитанный от его середины, при различных температурах и времени отжига.

1 — исходная поверхность; 2 — 1020° С, 1 мин; 3 — 1090° С, 1 мин; 4 — 1120° С, 1 мин; 5 — 1120° С, 2 мин.

адсорбционных мест и потоку молекул на поверхность, т.е. давлению газа,

$$v_a = k_a P \cdot S_0/S = k_a P(S - S_1)/S = k_a P(1 - \theta),$$

где $\theta = S_1/S$ — доля поверхности, покрытой адсорбированными молекулами.

Скорость десорбции v_d пропорциональна числу занятых адсорбционных мест и может быть записана в виде

$$v_d = k_d S_1/S = k_d \cdot \theta.$$

Предположим, что на поверхности под воздействием электронного пучка происходит химическая реакция между адсорбированным аммиаком и кремнием, в результате чего высвобождающийся водород десорбируется, а азот удаляется с поверхности в объем, формируя нитрид кремния. Таким образом, в результате такой реакции часть мест адсорбции освобождается. В рамках такого предположения скорость нитридации должна быть пропорциональна доле поверхности, покрытой адсорбатом (θ), и потоку электронов (n_e), т.е. скорость нитридации равна

$$v_N = k_N n_e \theta. \quad (1)$$

Таким образом, толщина слоя нитрида кремния, сформированного за время t , определяется следующим выражением:

$$d_N(t) = \int_0^t v_N d\tau = \int_0^t k_N \theta(\tau) n_e d\tau = k_N n_e \int_0^t \theta(\tau) d\tau. \quad (2)$$

Изменение заполнения поверхности $d\theta$ за время dt можно записать в виде

$$d\theta(t) = (v_a - v_d - v_N)dt = \{Pk_a[1 - \theta(t)] - k_d\theta(t) - k_N n_e \theta(t)\}d\tau.$$

Решая (2) при начальном условии $\theta(t)|_{t=0}$, получим

$$\theta(t) = a + (\theta_0 - a) \cdot e^{-bt}, \quad (3)$$

где $a = P \cdot v_a/b$, $b = Pk_a + k_d + k_N \cdot n_e$.

Зависимость $\theta(t)$ при различных начальных заполнениях поверхности θ_0 приведена на рис. 5. Анализ уравнения (3) показывает, что в зависимости от начального заполнения равновесное заполнение поверхности $\theta(t)$ при малых временах либо увеличивается при $\theta_0 < a$, либо уменьшается при $\theta_0 > a$. При достаточно больших временах заполнение поверхности $\theta(t)$ не зависит от начального заполнения поверхности θ_0 и определяется только соотношением скоростей адсорбции, десорбции и нитридации.

Подставляя (3) в (1) и (2) и интегрируя (2), получим зависимости скорости нитридации и толщины пленки нитрида кремния от времени

$$v_N = n_e k_N [a + (\theta_0 - a) \cdot e^{-bt}], \quad (4)$$

$$d_N = n_e k_N / b [Pk_a \cdot t + (\theta_0 - a)(1 - e^{-bt})]. \quad (5)$$

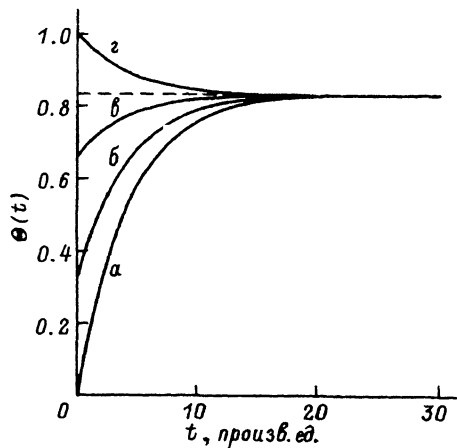


Рис. 5. Зависимость заполнения поверхности от времени экспозиции при различных начальных условиях.

$a - \theta_0 = 0$, $б - 0.33$, $в - 0.66$, $z - 1$.

Анализ уравнений (4) и (5) показывает, что на начальных стадиях процесса электронно-стимулированной нитридации как скорость, так и результирующая толщина слоя нитрида определяются начальным заполнением поверхности. Если начальное заполнение поверхности $\theta_0 = 0$, то скорость нитридации мала на начальном этапе, затем увеличивается и становится постоянной и равной $a \cdot n_e k_N$ после установления равновесного заполнения поверхности (рис. 5). Именно такое поведение d_N от времени наблюдалось экспериментально (рис. 6) для $\theta_0 = 0$. При дальнейшем увеличении времени экспозиции толщина пленки нитрида кремния достигает насыщения, что, вероятнее всего, связано с уменьшением скорости доставки азота к границе раздела Si/Si₃N₄, обусловленное конечной скоростью диффузии азота в Si₃N₄.

Если сначала проэкспонировать поверхность до насыщения ($\theta_0 = 1$), а затем включить электронный пучок, то скорость нитридации будет большой на начальном этапе, затем уменьшится и станет постоянной и равной $a \cdot n_e k_N$, как и для случая $\theta_0 = 0$. Именно такое поведение и наблюдается в эксперименте, если сначала проэкспонировать поверхность в аммиаке до насыщения, а затем начать электронное облучение. Ре-

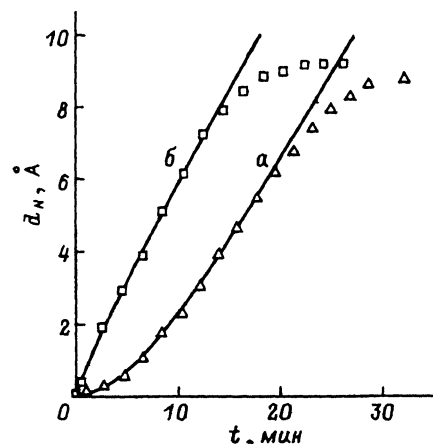


Рис. 6. Изменение толщины пленки нитрида кремния при экспонировании в аммиаке ($P = 7 \cdot 10^{-8}$ Торр) при электронном облучении ($I = 1.2 \cdot 10^{-6}$ А).

$a - \theta_0 = 0$, $б - 1$; точки — экспериментальные значения, линии — рассчитанные по уравнению (5).

зультаты этого эксперимента приведены на рис. 6 и находятся в полном соответствии с уравнениями (4) и (5).

Уравнение (4) правильно описывает зависимость скорости нитридации от давления. Действительно, для некоторого момента времени t_0 при $\theta_0 = 0$ v_N можно привести к виду

$$v_N \sim \frac{k_a P}{k_a P + c} (1 - d \cdot e^{-k_a t_0 P}),$$

где c и d — некоторые постоянные.

Легко видеть, что выражение вида (6) хорошо описывает экспериментальную зависимость, приведенную на рис. 1 б.

Для того чтобы определить значение k_N , необходимо использовать данные для больших значений давления и малых плотностей электронов. Следует отметить, что k_d при наших экспериментальных условиях мало, так как коэффициент прилипания аммиака при КТ близок к единице [2117]. В этом случае $Pk_a \gg k_d \cdot n_e$. Учитывая, что в уравнении (5) вторым членом можно пренебречь, так как равновесие на поверхности устанавливается достаточно быстро, толщина слоя нитрида кремния оказывается пропорциональной k_N , т.е. $d_N = n_e k_N \cdot t$. Используя экспериментальные данные для больших давлений ($P = 10^{-6}$ Тор, $I = 1.2 \cdot 10^{-6}$ А), когда зависимость $d_N(t)$ линейна и $n_e = 2.7 \cdot 10^{-2}$ А/см², получили значение $k_N = 0.85 \cdot 10^{-19}$ А·см² (рис. 1, а, кривая 1). Учитывая величину атомного объема для Si₃N₄, получим, что 1 электрон приводит к образованию $\sim 4 \cdot 10^{-5}$ связей Si-N.

Выводы

Методом электронной оже-спектроскопии изучена кинетика нитридации поверхности Si(100) в чистом аммиаке под воздействием электронного облучения с энергией 2.5 КэВ в условиях СВВ и КТ. Показано, что электронное облучение стимулирует химические реакции, протекающие на поверхности кремния при взаимодействии с NH₃. Найденно, что скорость роста нитридной пленки пропорциональна потоку электронов и увеличивается с ростом давления аммиака в исследованном диапазоне давлений. Данные оже-анализа позволяют считать полученные пленки нитридом кремния стехиометрического состава Si₃N₄, а их качество — близким к пленкам нитрида кремния, полученным прямой термической нитридацией. Показано, что процесс электронно-стимулированной нитридации происходит на поверхности образца и скорость образования нитрида кремния пропорциональна заполнению поверхности молекулами аммиака и потоку электронов. Определена скорость электронно-стимулированной нитридации. Столкновение одного электрона с поверхностью приводит к образованию $\sim 4 \cdot 10^{-5}$ связей Si-N.

Список литературы

- [1] *Glachant A., Saidi D.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 1985. Vol. 3. N 4. P. 985-991.
- [2] *Bozso F., Avouris Ph.* // Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 57. N 9. P. 1185-1188.
- [3] *Hlil E.K., Kubler L., Bischoff J.L., Bolmont D.* // Phys.Rev.B. 1987. Vol. 35. N 11. P. 5913-5926.
- [4] *Hamers R.J., Avouris Ph., Bozso F.* // J.Vac. Sci.Technol.A. 1988. Vol. 6. N 2. P. 508-516.
- [5] *Hamers R.J., Avouris Ph., Bozso F.* // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 59. N 18. P. 2071-2074.

- [6] *Avouris Ph., Bozso F., Hamers R.J.* // J.Vac.Sci.Technol.B. 1987. Vol. 5. N 5. P. 1387-1392.
- [7] *Bozso F., Avouris Ph.* // Phys.Rev.B. 1988. Vol. 38. P. 3937-3942.
- [8] *Taylor P.A., Wallace R.M., Choyke W.J. et al* // Surf.Sci. 1989. Vol. 215. N 1-2. P. 1286-1292.
- [9] *Larsson C.U.S., Flodstrom A.S.* // Surf.Sci. 1991. Vol. 241. N. 3. P. 353-356.
- [10] *Rangelov G., Stober J., Eisenhut B., Fauster Th.* // Phys.Rev.B. 1991. Vol. 44. N 4. P. 1954-1957.
- [11] *Chen P.J., Colaianni M.L., Yates, Jr. J.T.* // Surf. Sci. 1992. Vol. 274. N 3. P. L605-L610.
- [12] *Cherif S.M., Lacharme J.-P., Sebenne C.A.* // Appl.Surf. Sci. 1992. Vol. 56-58. P. 777-781.
- [13] *Cherif S.M., Lacharme J.-P., Sebenne C.A.* // Surf. Sci. 1992. Vol. 262. P. 33-41.
- [14] *Delord J.L., Schrott A.G., Fain S.C.Jr.* // J.Vac.Sci.Technol. 1980. Vol. 17. N 1. P. 517-520.
- [15] *Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Храпцова Е.А.* // ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 24. P. 51-54.
- [16] *Glachant A., Saidi D., Delord J.F.* // Surf. Sci. 1986. Vol. 168. N 1-3. P. 672-680.

Институт автоматизации и процессов
управления с вычислительным центром
Владивосток

Поступило в Редакцию
12 января 1992 г.