

01;11

## Теоретическая модель для описания деградации тонких водородсодержащих пленок

© Г.В. Гадияк<sup>1</sup>, В.Г. Гадияк<sup>2</sup>, М.Л. Косинова<sup>3</sup>, Е.Г. Сальман<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Институт неорганической химии СО РАН, Новосибирск, Россия

(Поступило в Редакцию 4 марта 1996 г.)

Предложена новая теоретическая модель для описания поведения пленок составных водородсодержащих соединений при термических обработках. В основе модели лежит термическая генерация атомов водорода и атомов составных соединений с их последующей диффузией к границам и просачиванием через поверхность в атмосферу. Выполнены расчеты по термической обработке пленок нитрида кремния. Сравнение с литературными экспериментальными данными показывает высокую эффективность предлагаемой модели.

### Введение

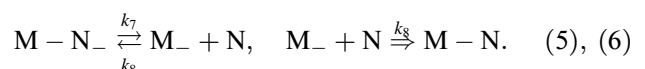
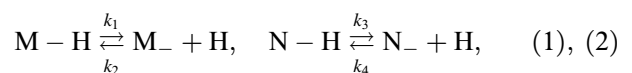
Тонкие полупроводниковые и диэлектрические пленки, получаемые как традиционным методом газофазного осаждения, так и новыми методами, использующими нетермическую активацию (фото- и плазмоактивацию), содержат большое количество водорода [1–3]. Его присутствие во многом определяет физико-химическую стабильность и эксплуатационные характеристики материала. Присутствие водорода сказывается на электрических характеристиках и надежности приборов и устройств, использующих эти материалы. В частности, в МНОП структурах (металл–нитрид кремния–оксид кремния–полупроводник), использующих нитрид кремния для записи заряда, концентрация ловушек для электронов и дырок является одним из определяющих параметров, влияющих на надежность приборов [4]. В работе [5] была рассмотрена простая модель дегидрирования слоев нитрида кремния, достаточно хорошо объясняющая экспериментальные данные, полученные тензометрическим методом по отжигу N–H связей. Модель учитывала следующие процессы: 1) разрыв N–H связей с образованием атомарного водорода, 2) восстановление N–H связей, 3) диффузию атомарного водорода к внешней границе раздела, 4) образование молекулярного водорода и его десорбцию (“переход водорода через поверхность” [5]) с поверхности пленки; 5) адсорбцию молекулярного водорода на поверхности пленки.

Авторы также предполагали  $C_{NH}^0 \gg C_{NH}^\infty$ , что соответствует полному удалению водорода из пленки при  $t \rightarrow \infty$ . Система уравнений, описывающих названные процессы, была решена в предельных случаях ограничения процесса дегидрирования разрыва N–H связей, его переносом через пленку, переходом водорода через поверхность. В первом случае скорость разложения не зависит от толщины пленки  $d_0$ , во втором скорость процесса  $dC/dt \sim d_0^{-2}$ , а в третьем  $dC/dt \sim d_0^{-1}$ .

Однако модель работы [5,6] не полностью описывает превращения, происходящие в пленке при отжиге. Так, ранее в [7] было показано, что при отжиге пленок нитрида кремния, наряду с водородом происходит выделение азота, что не отражено в уравнениях кинетики работы [5]. Кроме того, модель применима в ограниченном диапазоне температур, выше температуры разрыва Si–H связей. В то же время электрические свойства пленок нитрида кремния, в частности концентрация заряженных дефектов, зависят от содержания ненасыщенных (оборванных) связей кремния, азота в конфигурациях (в простой вакансии азота N=Si, дивакансии Si=N, вакансии кремния Si–N и дивакансий Si–N..N–Si), являющихся ловушками для носителей заряда. Эти ловушки определяют различные зарядовые характеристики приборов [4,8–10] типа металл–диэлектрик–полупроводник, а именно фиксированный заряд, плотность поверхностных состояний, положение центроида захваченного сильно-полевым воздействием заряда и пр. Цель настоящей работы — разработка теоретической модели физико-химических превращений в тонких водородсодержащих пленках, связывающих технологические условия отжига пленок с их зарядовыми характеристиками.

### Физическая модель

Предполагается, что в тонкой пленке материала  $MN_x:H$  (где  $M = Si, B$ ) существуют связи M–N; M–H; N–H. Процессы, протекающие в пленке могут быть описаны следующей системой квазихимических уравнений:



Уравнение (1) описывает разрыв связи М–Н с константой реакции  $k_1$ , и образование связи М–Н с константой обратной реакции  $k_2$ . Уравнение (2) описывает аналогичные процессы для N–Н связи с константами прямой и обратной реакций  $k_3$  и  $k_4$  соответственно. Уравнения (3) и (4) характеризуют процесс образования молекулярного водорода в объеме пленки с участием связей М–N и N–H соответственно с константами реакции  $k_5$ ,  $k_6$  [11]. Уравнение (5) учитывает возможность образования свободного атомарного азота и его захват на свободную (оборванную) связь М с константой разрыва связи М–N\_  $k_7$  и константой  $k_8$  захвата азота на оборванную связь. Предполагается, что азот имеет оборванную связь М–N\_. И наконец, уравнение (6) описывает процесс насыщения связей оборванных связей М\_. При записи уравнения (5) предполагалось, что реакция разрыва связей М–N не происходит, образование свободного азота имеет место только при разрыве М–N\_ (азот с оборванной связью) (5).

Системе уравнений химической кинетики (1)–(6) соответствуют следующие уравнения:

$$\frac{\partial C_H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_H \frac{\partial C_H}{\partial x} \right) + k_1 C_{MH} + k_3 C_{NH} - k_2 C_H C_M - k_4 C_H C_{N-} - k_5 C_H C_{MH} - k_6 C_H C_{NH}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_{MH}}{\partial t} = -k_1 C_{MH} + k_2 C_{M-} C_H - k_5 C_{MH} C_H, \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_{M-}}{\partial t} = k_1 C_{MH} - k_2 C_{M-} C_H - k_5 C_{MH} C_H + k_7 C_{MN-} - k_8 C_{M-} C_N, \quad (9)$$

$$\frac{\partial C_{H_2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{H_2} \frac{\partial C_{H_2}}{\partial x} \right) + k_5 C_{MH} C_H + k_6 C_{NH} C_H, \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_{NH}}{\partial t} = -k_3 C_{NH} + k_4 C_{N-} C_H - k_6 C_{NH} C_H, \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_{N-}}{\partial t} = -k_7 C_{MN-} + k_3 C_{NH} - k_4 C_{N-} C_H + k_6 C_{NH} C_H, \quad (12)$$

$$\frac{\partial C_N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_N \frac{\partial C_N}{\partial x} \right) + k_7 C_{MN-} - k_8 C_{M-} C_N, \quad (13)$$

где константы  $k_1$ ,  $k_3$ ,  $k_7$  характеризуют скорость термической генерации атомов водорода при разрыве связей М–Н, N–H и атомов азота при разрыве связей М–N\_, соответственно; константы  $k_2$ ,  $k_4$ ,  $k_8$  характеризуют скорость образования связей водорода с оборванными связями М\_, N\_ и захвата атомов азота на оборванные связи М\_ соответственно; константы  $k_5$ ,  $k_6$  характеризуют скорость образования молекулярного водорода в пленке;  $D_H$ ,  $D_{H_2}$ ,  $D_N$  — коэффициенты диффузии для атомарного, молекулярного водорода и атомарного азота. Здесь  $C_{MH}$ ,  $C_{NH}$  — концентрации атомов водорода на связях М–Н, N–H и концентрации  $C_{M-}$ ,  $C_{N-}$  оборванных связей соответственно;  $C_H$ ,  $C_{H_2}$  — концентрации свободного

атомарного и молекулярного водорода и азота соответственно. Для системы уравнений (7)–(13) использовались следующие граничные условия: непроницаемая для водорода и азота внутренняя граница

$$\frac{\partial C_H}{\partial x}(x=L, t) = 0; \quad \frac{\partial C_{H_2}}{\partial x}(x=L, t) = 0;$$

$$\frac{\partial C_N}{\partial x}(x=L, t) = 0,$$

на внешней границе использовалось равенство потоков

$$-D_H \frac{\partial C_H}{\partial x}(x=0, t) = K_{10} C_H - K_{11} C_H^{\text{cham}}, \quad (14)$$

$$-D_{H_2} \frac{\partial C_{H_2}}{\partial x}(x=0, t) = K_{20} C_{H_2} - K_{21} C_{H_2}^{\text{cham}}, \quad (15)$$

$$-D_N \frac{\partial C_N}{\partial x}(x=0, t) = K_{30} C_N - K_{31} C_N^{\text{cham}}, \quad (16)$$

Здесь предполагалось, что выход водорода и азота происходит через стадию десорбции продуктов с поверхности.  $C_H^{\text{cham}}$ ,  $C_{H_2}^{\text{cham}}$ ,  $C_N^{\text{cham}}$  — концентрации атомарного, молекулярного водорода и азота в вакуумной камере. Предполагается, что в вакуумной камере происходит быстрая рекомбинация атомарного водорода и азота с образованием молекулярных форм, т.е. время рекомбинации  $\tau_{\text{rec}}$  много меньше характерных диффузионных времен  $\tau_{\text{dif}}$  и характерных времен образования азота, водорода в пленке  $\tau_{\text{reac}}$ . Поэтому  $C_H^{\text{cham}} = 0$ ,  $C_N^{\text{cham}} = 0$ . Константы  $K_{10}$ ,  $K_{20}$ ,  $K_{30}$  характеризуют проницаемость границы пленки для продуктов реакции в ней. Проницаемость молекулярного водорода из вакуумной камеры в пленку полагалась равной нулю. Другими словами, процесс адсорбции молекулярного водорода предполагался очень медленным и с малым коэффициентом прилипания. Кроме того, мы учли также проницаемость кварцевого стекла вакуумной камеры для водорода. В этом случае для потока водорода из камеры в атмосферу комнаты можно записать соотношение

$$J_{H_2} = \gamma_2 (C_{H_2} - C_{H_2}^{\text{amb}}) S_{\text{cham}}, \quad (17)$$

где  $\gamma_2$  — константа проницаемости кварца толщиной  $l_0$ ,  $S_{\text{cham}}$  — поверхность вакуумной камеры (появились еще дополнительные константы и параметры задачи  $\gamma_2$ ,  $S_{\text{cham}}$ ,  $l_0$ ).

Для азота стенки камеры предполагались непроницаемыми, как об этом свидетельствует эксперимент [7].

Начальные условия для концентраций задавались в виде однородных по толщине пленки профилей

$$C_{MH}(x, t=0) = C_{MH}^0, \quad C_{M-}(x, t=0) = C_{M-}^0,$$

$$C_{NH}(x, t=0) = C_{NH}^0,$$

$$C_{N-}(x, t=0) = C_{N-}^0, \quad C_{H_2}(x, t=0) = 0,$$

$$C_H(x, t=0) = 0, \quad C_N(x, t=0) = 0.$$

Для концентрации оборванных связей в начальный момент времени мы использовали экспериментальные данные для тестового примера с нитридом кремния [7,10], которые свидетельствуют о том, что концентрация N–H связей  $C_{NH}^0 = 2.4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ , концентрация Si–H связей и оборванных связей  $Si_-$  и  $N_-$  предполагалась незначительной, т.е. имеем  $C_{SiH}^0 < 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $C_{Si_-}^0 < 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $C_{N_-}^0 < 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Для численного решения системы уравнений (7)–(13) использовалась неявная схема. Производные по времени аппроксимировались с первым порядком точности. Шаг по времени выбирался растущим по времени с инкрементом роста  $\delta t^n / \delta t^{n-1} = 1.1$ .

Для аппроксимации пространственных производных использовалась консервативная схема второго порядка точности на неравномерной сетке. Нелинейная система разностных уравнений решалась последовательными скалярными прогонками с использованием решения с предыдущей итерации. Точность расчетов была не хуже чем 0.1%.

Для оценки параметров  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, D_H, D_{H_2}, D_N, K_{10}, K_{20}, K_{30}$  были использованы следующие соображения. Для коэффициентов диффузии  $D_H, D_{H_2}, D_N$  и скоростей генерации предполагался аррениусовский закон

$$D_i = D_{i0} \exp(-\delta E_i / kT),$$

$$k_j = f_{j0} \exp(-\delta E_j / kT),$$

где энергии активации  $\delta E_i$  для диффузии  $i = H$  атомарного водорода 0.45 эВ [12], для  $i = H_2$  молекулярного водорода 0.45 эВ, для  $i = N$  атомарного азота 2.43 эВ [13,14].

Энергии активации для разрыва связей  $\delta E_j$ ,  $\delta E_1 = 1.5$  эВ для разрыва Si–H связи [8],  $\delta E_3 = 2.0$  эВ для разрыва N–H связи,  $\delta E_7 = 2.2$  эВ для разрыва Si–N связи;  $f_{j0}$  — частотный фактор, имеющий порядок характерной частоты фоновых колебаний атомов в решетке  $f_0 \sim 10^{11} \text{ с}^{-1}$ . Для констант реакций  $k_2, k_4, k_5, k_6, k_8$  использовалось диффузионное приближение. Тогда можно записать:

$$k_2 = 4\pi D_H r_{MH} \xi_2, \quad k_4 = 4\pi D_H r_{NH} \xi_4, \quad k_5 = 4\pi D_H r_{MNH} \xi_5,$$

$$k_6 = 4\pi D_H r_{NHN} \xi_6, \quad k_8 = 4\pi D_H r_{MN} \xi_8,$$

где  $r_{MH}, r_{NH}$  — радиус взаимодействия атомарного водорода с оборванными связями атомов M и атомов N соответственно;  $r_{MNH}, r_{NHN}$  — радиусы взаимодействия атомов водорода с атомами водорода на связях M–H и N–H соответственно;  $r_{MN}$  — радиус взаимодействия атомарного азота с оборванными связями атомов M; константы  $\xi_2, \xi_4, \xi_5, \xi_6, \xi_8$  характеризуют вероятность того, что подошедший к дефекту атом насытит оборванные связи в реакциях (1), (2), (5), (6) или образует молекулярный водород в реакциях (3), (4). Приведем значения всех использованных констант:  $K_{10} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $K_{20} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $K_{30} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $f_1 = 10^7 \text{ с}^{-1}$ ,  $f_3 = 10^9 \text{ с}^{-1}$ ,  $f_7 = 10^9 \text{ с}^{-1}$ ,  $\delta E_1 = 1.5$  эВ,  $\delta E_3 = 2.0$  эВ,  $\delta E_7 = 2.2$  эВ,  $D_{H0} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $\delta E_H = 0.45$  эВ,  $D_{H_20} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $\delta E_{H_2} = 0.45$  эВ,  $D_{N0} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $\delta E_N = 2.43$  эВ,  $r_{MH} = 10^{-7} \text{ см}$ ,  $r_{NH} = 10^{-7} \text{ см}$ ,  $r_{MNH} = 10^{-7} \text{ см}$ ,  $r_{NHN} = 10^{-7} \text{ см}$ ,  $r_{MN} = 10^{-7} \text{ см}$ ,  $\xi_2 = 10^{-5}$ ,  $\xi_4 = 10^{-5}$ ,  $\xi_5 = 10^{-7}$ ,  $\xi_6 = 10^{-6}$ ,  $\xi_8 = 10^{-6}$ ,  $\gamma_1 = 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $\gamma_2 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ .

## Результаты расчетов и дискуссия

Для тестирования предлагаемой модели использовались экспериментальные данные по измерению зависимости давления в вакуумной камере от времени при термической обработке. Поскольку при решении задачи (7)–(13) мы знаем диффузионные потоки атомарного и молекулярного водорода и азота, то мы можем найти концентрации азота и водорода от времени: для азота имеем

$$C_{N_2}^{\text{cham}}(t) = -1/2V_0 \int_0^t S_k D_N \frac{\partial C_N}{\partial x}(x=0, t) dt, \quad (18)$$

для водорода имеем

$$C_{H_2}^{\text{cham}}(t) = -1/V_0 \left( \int_0^t S_k \left( D_{H_2} \frac{\partial C_{H_2}}{\partial x}(x=0, t) + D_H/2 \frac{\partial C_H}{\partial x}(x=0, t) \right) dt - \int_0^t S_{\text{cham}} \gamma_2 (C_{H_2}^{\text{cham}} - C_{H_2}^{\text{cham}}(t)) dt \right), \quad (19)$$

где  $V_0$  и  $S_{\text{cham}}$  — объем и поверхность вакуумной камеры,  $\gamma_2$  — коэффициенты проницаемости кварца для молекулярного водорода.

В модели идеального газа можно вычислить парциальные давления водорода и азота

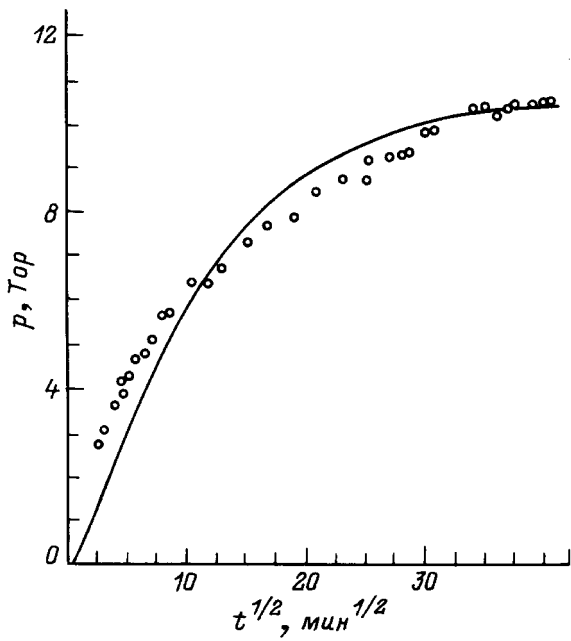
$$P_{N_2}(t) = C_{N_2}^{\text{cham}}(t) \cdot k_B T, \quad (20)$$

$$P_{H_2}(t) = C_{H_2}^{\text{cham}}(t) \cdot k_B T, \quad (21)$$

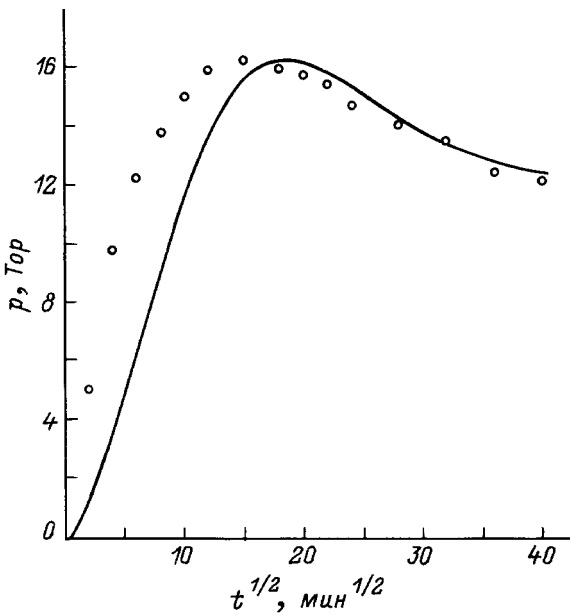
Последние величины были измерены экспериментально в [7]. При решении задачи (7)–(13) нами были рассмотрены также краевые условия другого типа. Приближение (7)–(13), (14)–(16) предполагает, что водород и азот выходят на поверхность и затем десорбируются с нее с характерным временем  $\tau_d \ll \tau_{\text{des}}$ . Кроме того, предполагалось, что обратный процесс — адсорбция азота и водорода и затем их проникновение в пленку заблокированы. Возможна также другая постановка краевого условия на внешней поверхности пленки [15]: поток частиц из пленки пропорционален разности концентраций в пленке и камере. Например, для азота имеем

$$J_N \simeq h_N (C_N - C_N^{\text{cham}}),$$

где  $h_N$  — проницаемость поверхности для азота.



**Рис. 1.** Зависимость от времени давления азота в камере. Пленка  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Кружки — экспериментальные значения из [6], сплошная кривая — расчет.

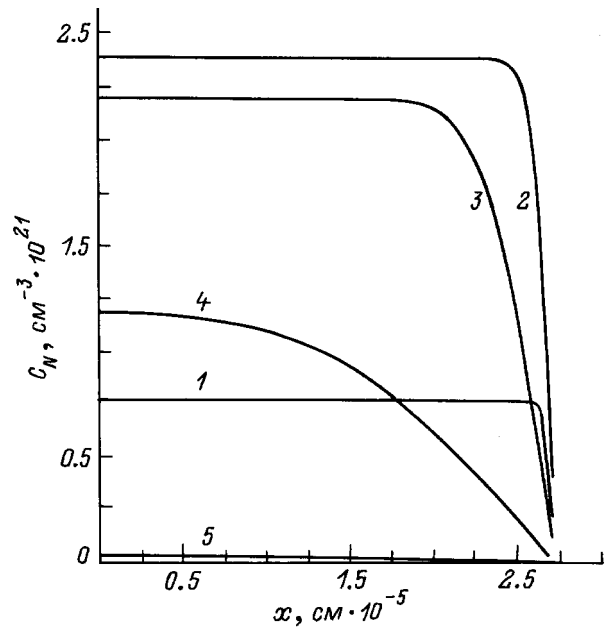


**Рис. 2.** Зависимость от времени полного давления. Пленка  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; обозначения те же, что и на рис. 1.

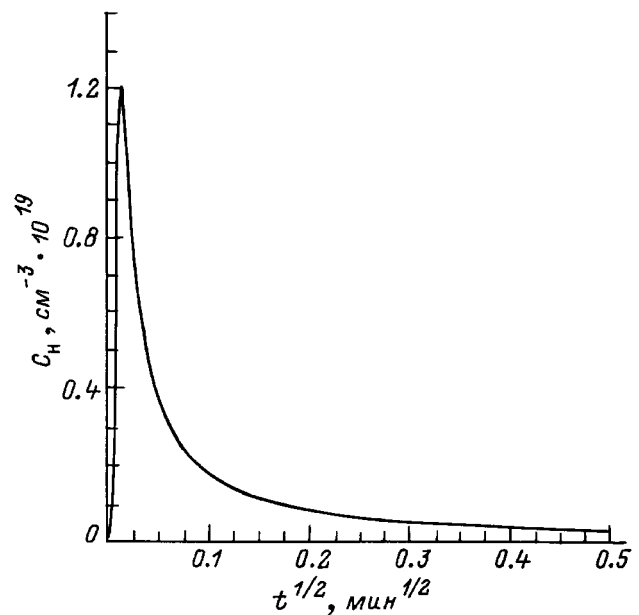
Исследование последнего краевого условия показало, что в этом случае не удастся достичь экспериментальных значений давления азота в камере. Расчетное значение давления было всегда на 2 порядка ниже экспериментального при варьировании параметров в широком диапазоне их значений.

На рис. 1 представлены экспериментальные и расчетные значения давления азота в камере. Определяющими

параметрами, влияющими на воспроизведение экспериментальных значений, являются начальная концентрация N–H связей  $C_{\text{NH}}^0$ , проницаемость поверхности пленки  $K_{30}$  и коэффициент диффузии  $D_{\text{N}}$ . Начальная концентрация  $C_{\text{NH}}^0$  и проницаемость  $K_{30}$  влияют на максимальное значение давления азота, значения проницаемости и коэффициента диффузии влияют на скорость роста давления (задают производную от времени давления в начальный момент и вогнутость или выпуклость профиля — знак у второй производной).



**Рис. 3.** Распределение свободного азота по толщине структуры.  $t, \text{с}$ : 1 —  $10^1$ , 2 —  $10^2$ , 3 —  $10^3$ , 4 —  $10^4$ , 5 —  $10^5$ .



**Рис. 4.** Зависимость концентрации атомарного водорода от времени.

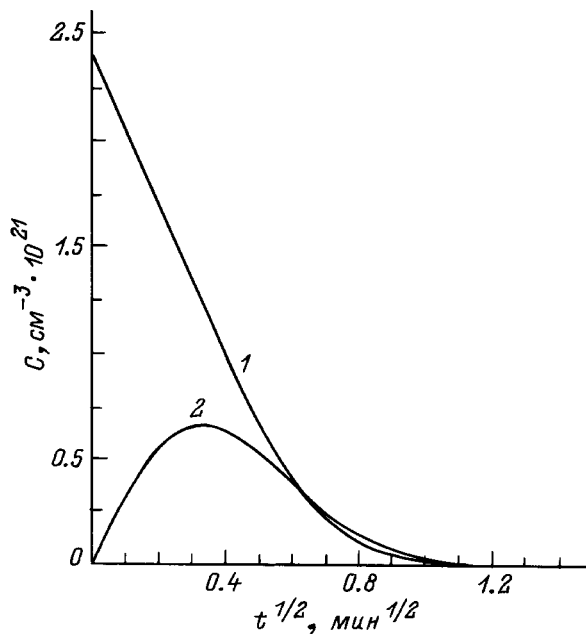


Рис. 5. Зависимость концентраций N–Н связей (1) и оборванных связей азота (2) от времени.

На рис. 2 представлены экспериментальные и расчетные значения полного давления от времени. Заметим, что на начальных временах полное давление определяется давлением водорода, затем к моменту времени  $\approx 10^2$  мин давление водорода достигает своего максимального значения и начинает уменьшаться за счет проницаемости кварцевых стенок. Поэтому, начиная с времен  $\approx 10^2$  мин, когда произошло выравнивание значений давления азота и водорода, давление азота определяет поведение кривой полного давления. Определяющими параметрами, влияющими на положение и величину максимального давления, являются проницаемость молекулярного водорода  $K_{20}$  через поверхность пленки, проницаемость кварцевых стенок камеры  $\gamma_2$  для атомарного и молекулярного водорода. На рис. 3 представлено распределение концентрации атомарного азота  $C_N$  по толщине пленки для различных моментов времени. Как следует из рисунка, профиль азота однороден по толщине, только на больших временах концентрация азота вблизи поверхности заметно снижается, так как уменьшается генерация атомов азота, а проницаемость поверхности остается прежней. Профили остальных концентрационных функций  $C_{NH}$ ,  $C_N$ ,  $C_H$ ,  $C_{H_2}$ ,  $C_{SiH}$ ,  $C_{Si}$  остаются однородными функциями по толщине и меняются только их поведение со временем (рис. 4–7). Так, на рис. 4 представлена зависимость концентрации атомарного водорода со временем. Сначала происходит быстрый рост концентрации до момента времени  $t \sim 10^{-4}$  мин благодаря термическому разрыву связей N–H, а затем после достижения  $C_H \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  значение концентрации уменьшается, так как происходит истощение источника водорода (рис. 5) — начальной концентрации N–H связей. Поведение во времени, ана-

логичное водороду, имеет концентрация азота (кривая 3 на рис. 6). Характерное время достижения максимума концентрации  $\sim 2$  мин, что много больше времени достижения пика концентрации подвижного водорода. Эти времена связаны с отношением коэффициентов диффузии  $t_H/T_N \sim D_N/D_H$ . Благодаря малому значению коэффициента диффузии (по сравнению с водородом) и меньшему значению проницаемости максимальное значение концентрации подвижного азота достигает величины начально-временной концентрации N–H связей  $C_N \sim C_{NH} \sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Такой же порядок имеют значения максимальной концентрации молекулярного водорода  $C_{H_2}$  и оборванных связей кремния  $C_{Si}$ . Время

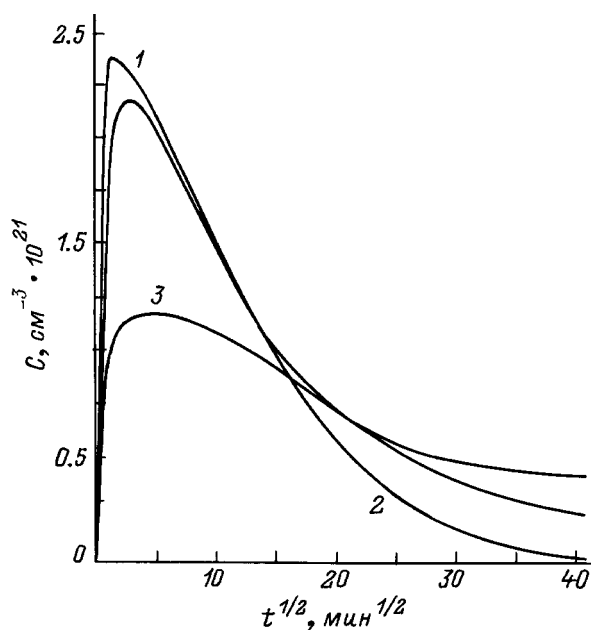


Рис. 6. Зависимость концентрации от времени. 1 — молекулярный водород, 2 — оборванные связи кремния, 3 — атомарный азот.

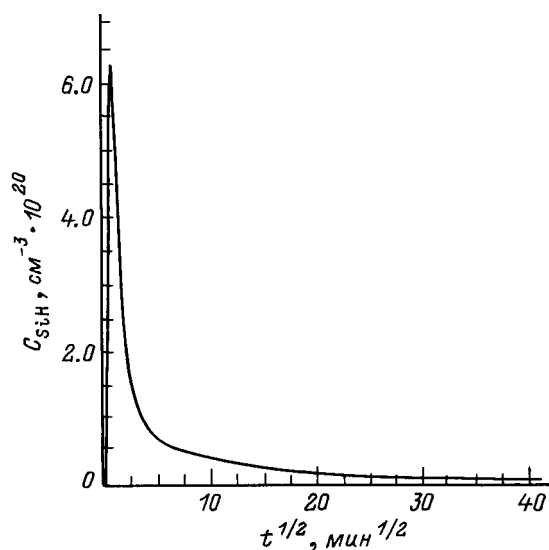


Рис. 7. Зависимость концентрации Si–H связей от времени.

достижения максимума остается прежним. Заметим, что на больших временах концентрация  $C_{Si}$  оборванных связей кремния выходит на плато со значением  $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ .

Как показали наши расчеты, параметры  $\xi_i$  для констант обратных реакции при подгонке оказались малыми величинами ( $\ll 1$ ) (см. приведенные выше параметры). Последнее свидетельствует о том, что полученные дефекты  $Si_{-}$  или  $N_{-}$  являются неустойчивыми и происходит энергетическая релаксация центров к уже другой геометрической конфигурации дефекта. В частности, в месте образования азотной вакансии оборванные связи кремния замыкаются друг на друга и перестроенный дефектный центр уже не является парамагнитным [8,16].

Как следует из этих расчетов, при термической обработке происходит не только удаление водорода из пленки, но и немонотонно меняется концентрация оборванных связей, являющихся ловушками для носителей. Поэтому последний результат может привести к электрической деградации пленки, а следовательно, к деградации приборной структуры. Немонотонное изменение концентрации оборванных связей со временем требует внимательного отношения к процессу отжига структуры. В частности, на малых временах отжига возможно увеличение концентрации дефектов вместо ее уменьшения.

В заключение авторы хотели бы выразить благодарность В.А. Гриценко за неоднократные обсуждения данной работы и И.И. Гадияк за помощь при оформлении рукописи.

Работа поддержана Правительством Российской Федерации и Международным научным фондом (грант № J-5C100).

## Список литературы

- [1] *Akkerman Z.L., Fainer N.I., Kosinova M.L. et al. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 1992. Vol. 1783. P. 530–540.*
- [2] *Akkerman Z.L., Kosinova M.L., Fainer N.I. et al. // Thin Solid Films. 1995. Vol. 260. P. 156–160.*
- [3] *Polyakov O.V., Badalian M.V. // Phys. Stat. Sol. (b) 1994. Vol. 185. P. K1–K4.*
- [4] *Ржанов А.В. Нитрид кремния в электронике. Новосибирск: Наука, 1982. 312 с.*
- [5] *Аккерман З.Л., Храмова Л.В., Смирнова Т.П. и др. // Неорган. материалы. 1990. Т. 26. № 5. С. 988–992.*
- [6] *Аккерман З.Л., Храмова Л.В., Смирнова Т.П. и др. // Неорган. материалы. 1990. Т. 26. № 5. С. 993–995.*
- [7] *Chramova L.V., Chusova T.P., Kokovin G.A. // Thin Solid Films. 1987. Vol. 147. P. 267–273.*
- [8] *Гриценко В.А. Строение и электронная структура аморфных диэлектриков в кремниевых МДП структурах. Новосибирск: Наука, 1993. 278 с.*
- [9] *Robertson J. // Philosophical Magazine B. 1994. Vol. 69. N 2. P. 307–326.*
- [10] *Warren W.L., Robertson J., Kanicki J. // Appl. Phys. Lett. 1993. P. 2685–2697.*
- [11] *Гадияк Г.В. // ФТП. 1997. Т. 31. Вып. 3. С. 257–263.*
- [12] *Литовченко В.Г., Горбань А.П. Основы физики микроэлектронных систем металл–диэлектрик–полупроводник. Киев: Наукова думка, 1978. 313 с.*
- [13] *Stein H.J. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. // 1986. Vol. 59. P. 523–531.*
- [14] *Качурин Г.А., Тыщенко И.Е. // Микроэлектроника. 1994. Т. 23. Вып. 6. С. 3–12.*
- [15] *Deal B.E., Grove A.S. // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. P. 3770–3785.*
- [16] *Храмова Л.В., Чусова Т.П., Гриценко В.А. и др. // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1984. Т. 1. С. 10–11.*