

03;06;12

## К модели осаждения материалов на стенках капилляров из парогазовых смесей при импульсном нагреве

© В.В. Зотов, Е.П. Прокопьев

Научно-исследовательский институт материаловедения им. А.Ю. Малинина, 103460 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 4 августа 1997 г.)

Теоретически рассмотрено осаждение кремния в капиллярах в процессе термохимической реакции тетраглюрида кремния с водородом при импульсном нагреве. Показано, что в результате такой реакции существенно увеличивается равномерность скорости осаждения вдоль длины капилляра.

В практике изготовления полупроводниковых приборов и ИС возникает необходимость в осаждении материалов (полупроводников, диэлектриков и металлов) на стенках капиллярных щелей, отверстий и углублений для планаризации структуры, изготовления конденсаторов, вертикальных межсоединений, полевых транзисторов с вертикальными каналами и т.п. Известные способы такого осаждения основаны на выполнении стационарных термохимических реакций в парогазовых смесях при пониженном давлении. Однако для стационарных процессов характерна большая скорость роста осаждаемых слоев в устье капилляров по сравнению со скоростью осаждения на глубине. При понижении давления в реакторе увеличивается однородность толщины осаждаемого слоя, но она в ряде применений остается недостаточной. Кроме того, при понижении давления уменьшается скорость осаждения и, следовательно, производительность.

Ситуация существенно меняется при использовании импульсного нагрева подложки в парогазовых смесях. Ниже в качестве примера рассмотрена особенность осаждения кремния в капиллярах в таком режиме.

Процесс осаждения кремния из парогазовых смесей в капиллярах при импульсном нагреве подложки излучением имеет ряд ценных преимуществ перед стационарным режимом [1–9].

Пусть кремниевые подложки, находящиеся в атмосфере парогазовой смеси ( $\text{SiH}_4 + \text{H}_2$  или, например,  $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$ ), имеют сквозное отверстие или углубление диаметром  $D$  и глубиной  $L$ . Для простоты решения задачи будем считать, что в процессе облучения на подложку действует термический импульс, линейный во времени  $t$ , так что температура поверхности полости — капилляра, на стенках которого осаждаются слои кремния из парогазовых смесей, изменяется по закону [1]:

$$T_s(t) = 300 + 2053t. \quad (1)$$

Задача теории состоит в расчете скорости роста слоев кремния  $V_p[T_s(t), x]$  с тем, чтобы рассчитать толщину слоя, наращиваемого за импульс:

$$d_p[T_s(t_{\max}), x] = 2 \int_0^{t_{\max}} V_p[T_s(t), x] dt. \quad (2)$$

Если скорость реакции осаждения слоев гораздо выше скорости подъема температуры, то можем рассматривать процесс в полости в квазистационарном приближении для случая изотермического процесса в каждый из моментов времени в интервале от 0 до  $t$ . Направим ось  $x$  для полуоткрытой полости в направлении от дна (начало оси  $x$ ) в пространстве парогазовых смесей, а для открытой полости (сквозного отверстия в подложке) — от середины толщины подложки. В этом случае согласно [1–9] скорость роста слоев (А/мин) кремния на стенках полости для изотермического случая может быть записана в виде:

$$V_p(x) = 7.23 \cdot 10^{10} \times \frac{\frac{k_0 P}{RT_s} \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) \frac{D_0 T_s P_0}{RT_0^2} \exp\left[-\frac{D_0}{\delta(x)} \frac{T_s}{DT_0 \omega_0} x\right] x_0}{\frac{k_0 P}{RT_s} \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) \delta(x) + \frac{D_0 T_s P_0}{RT_0^2} \exp\left[-\frac{D_0}{\delta(x)} \frac{T_s}{DT_0 \omega_0} x\right]}. \quad (3)$$

Здесь  $P$  — давление в полости,  $k_0$  — предэкспоненциальный (частотный) множитель;  $E$  — энергия активации,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T_s$  — температура полости,  $D_0$  — коэффициент молекулярной диффузии кремнийсодержащего реагента,  $P_0 = 1.013 \cdot 10^6$ ,  $T = 273$  К,  $x_0$  — концентрация кремнийсодержащего реагента,  $D$  — диаметр полости,  $\omega_0$  — линейная скорость потока парогазовой смеси в полости,  $x$  — координата вдоль полости. Толщина пограничного слоя в полости  $\delta(x)$  может быть оценена по формуле

$$\delta(x) = \frac{\sqrt{x}}{\left[\frac{\rho_0 \omega_0}{\eta(T_s)}\right]^{1/2}}, \quad (4)$$

где  $\rho_0$  — плотность водорода,  $\eta(T_s)$  — динамическая вязкость, равная

$$\eta(T_s) = \eta_0 \left(\frac{T_s}{T_0}\right)^{1/2} \frac{1 + 234/T_0}{1 + 234/T_s}, \quad (5)$$

где  $\eta_0$  — значение  $\eta(T_s)$  при  $T_0 = 273$  К.

В зависимости от диаметра полости могут реализовываться различные режимы течения парогазовой смеси при подъеме температуры: молекулярное течение,

скользящий поток, ламинарное и турбулентное течение [10,11]. Предположим, что давление в полости с подъемом температуры меняется по закону

$$P = P_0 \frac{T_s(t)}{T_0}. \quad (6)$$

Процесс импульсного воздействия некогерентного источника света на подложки кремния в атмосфере  $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$  сопровождается довольно резким щелчком, характерным для слабой ударной волны [10]. В капиллярах интенсивность ударной волны по сравнению с ее интенсивностью в объеме реактора может резко возрастать в зависимости от размера капилляра. Однако, согласно [11], скорость распространения ударной волны в капилляре может быть принята по порядку величины, равной скорости звука, т.е.  $\omega_0 \approx 10^5 \text{ cm/s}$ . С этим значением  $\omega_0$  толщина пограничного слоя в открытой полости длиной  $175 \mu\text{m}$  в точке  $L/2$  составила величину  $\approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 8 \mu\text{m}$ . Таким образом, в качестве величины  $\delta$  можно брать в реальных условиях эксперимента величину диаметра полости  $D$ , т.е.  $\delta \approx D$ . Оценки показывают, что при  $D < 10 \mu\text{m}$  и  $L \approx 175 \mu\text{m}$  первый член в знаменателе формулы (3) гораздо меньше второго и формула (3) переходит в следующую:

$$V_p = 7.23 \cdot 10^{10} \frac{k_0 P}{RT_s} \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) x_0, \quad (7)$$

т.е. не зависит от  $x$  и обеспечивает высокую однородность толщины наращиваемых слоев кремния. Толщина наращиваемых слоев, согласно [1–9], может быть в этом случае оценена по формуле

$$d_p(t_{\max}) \approx 2V_p(t_{\max})/a_0, \quad (8)$$

где

$$a_0 = \ln V_p(t_{\max})/t_{\max}. \quad (9)$$

Оценим величину  $V_p(t_{\max})$  и  $d_p(t_{\max})$  по формулам (7)–(9) для стандартных условий тетрахлоридного процесса:  $k_0 \approx 10^7 \text{ cm/s}$ ,  $P = 1.013 \cdot 10^6 T_s/T_0 \text{ din/cm}^2$ ,  $E = 38\,000 \text{ cal/mol}$ ,  $x_0 = 10^{-2} \text{ lot of mol}$ . Для температуры  $T_s(t_{\max}) = 1473 \text{ K}$ , т.е. при  $t_{\max} = 0.571 \text{ s}$ , величина  $V_p(t_{\max}) = 0.571 \text{ s} = 7.423 \cdot 10^5 \text{ \AA/min}$ , а величина  $d_p(t_{\max}) = 0.571 \text{ s} = 1.499 \cdot 10^3 \text{ \AA} = 149 \text{ nm}$  при значении  $P_{\max} = P_0 T_s(t_{\max})/T_0$ . При атмосферном давлении  $P_{\max} = P_0 = 1.013 \cdot 10^6 \text{ din/cm}^2$ , величина  $d_p(t_{\max}) = 26.3 \text{ nm}$ , т.е. для наращивания полости диаметром  $D \approx 1 \mu\text{m}$  требуется порядка 7–35 импульсов вида (1), что согласуется с нашими экспериментальными данными [1].

## Список литературы

- [1] Прокопьев Е.П., Зотов В.В., Стаценко В.Н. // Высоко-чистые вещества. 1993. № 5. С. 165–173.
- [2] Прокопьев Е.П. // Высокочистые вещества. 1994. № 6. С. 63–76.
- [3] Прокопьев Е.П., Зотов В.В., Стаценко В.Н. // Высоко-чистые вещества. 1994. № 1. С. 39–47.
- [4] Прокопьев Е.П., Стаценко В.Н., Зотов В.В. // Высоко-чистые вещества. 1995. № 4. С. 54–66.
- [5] Прокопьев Е.П. // Высокочистые вещества. 1995. № 3. С. 57–65.
- [6] Прокопьев Е.П. // Высокочистые вещества. 1995. № 3. С. 66–77.
- [7] Прокопьев Е.П. // Физика и химия обраб. материалов. 1996. № 1. С. 76–87.
- [8] Прокопьев Е.П., Петров С.В., Белоусов В.С. // Петербургский журнал электроники. 1996. № 1. С. 29–40.
- [9] Прокопьев Е.П. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 2. С. 22–29.
- [10] Прокопьев Е.П., Зотов В.В., Стаценко В.Н. // ЖПХ. 1994. Т. 67. Вып. 3. С. 503–504.
- [11] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1986. 686 с.