

03;12

Термостимулированное течение легкоплавких стекол при планаризации рельефа поверхности микронэлектронных структур

© С.П. Жвавий, Г.Д. Ивлев, В.А. Пилипенко, В.Н. Пономарь

Институт электроники НАН Белоруссии,
220090 Минск, Белоруссия

(Поступило в Редакцию 24 ноября 1997 г.)

На основе модели, предполагающей ньютоновское вязкое течение под действием сил поверхностного натяжения, решена задача течения фосфоросиликатного и борофосфоросиликатного стекла в термостимулированном процессе планаризации рельефа микронэлектронных структур. Получены выражения для угла оплавления в зависимости от температурно-временных режимов термообработки и физических параметров стекол.

Фосфоросиликатное (ФСС) и борофосфоросиликатное (БФСС) стекла широко применяются в технологии интегральных схем для создания межуровневых диэлектрических слоев. Оплавлением стекла достигается сглаживание острых кромок на краях контактных окон и планаризация рельефа поверхности микронэлектронных структур. Процесс оплавления ФСС и БФСС исследовался в ряде работ [1–5]. Из полученных данных, однако, неясно, каковы функциональные зависимости угла оплавления ступеньки ФСС (БФСС) от режимов термообработки и физических параметров стекла. Кроме того, нет определенного ответа на вопрос, почему процесс оплавления, инициируемый секундным световым нагревом, идет значительно эффективнее, чем в условиях длительного изотермического отжига в печи.

Для описания процесса оплавления ступеньки стекла (рис. 1) будем исходить из модели, предполагаемой ньютоновское вязкое течение под действием сил поверхностного натяжения. В этом случае

$$\mu \frac{\partial v_x}{\partial y} = \frac{\sigma}{r}, \quad (1)$$

где μ — вязкость, v_x — скорость течения вдоль оси x , σ — поверхностное натяжение, r — радиус кривизны.

Течение стекла вызывается касательным напряжением $P_{xx} = -\sigma/r$. Кривую AB (рис. 1) можно рассматривать [4] как полуволну синусоидальной функции с

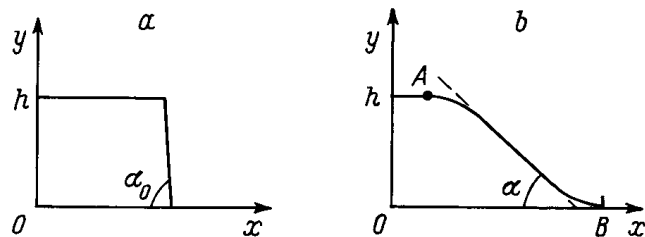


Рис. 1. Профиль ступеньки стекла ФФС до (а) и после (б) оплавления.

периодом $2x$ и амплитудой $h/2$. P_{xx} максимально при

$$r = \frac{x^2}{2\pi^2 h} = \frac{h}{2\pi^2} \operatorname{ctg}^2 \alpha. \quad (2)$$

Горизонтальное поле скорости течения жидкости с профилем "клина" можно представить в виде [6]

$$v_x(y) = \frac{3(2hy - y^2)}{2h^2} u, \quad (3)$$

где u — средняя скорость течения.

Подставляя (3) в (1), получим, что средняя скорость перемещения точки B (рис. 1) будет

$$u = \frac{h}{3\mu} \frac{\sigma}{r}. \quad (4)$$

С другой стороны, можно записать, что

$$u = \frac{dz}{dt} = -\frac{h}{\sin^2 \alpha} \frac{d\alpha}{dt}. \quad (5)$$

Подставив (2) и (5) в (4), получим уравнение

$$-\frac{\cos^2 \alpha}{\sin^4 \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \frac{2\pi^2}{3} \frac{\sigma}{\mu h}, \quad (6)$$

решение которого будет

$$\operatorname{ctg}^3 \alpha - \operatorname{ctg}^3 \alpha_0 = \frac{2\pi^2}{h} \int_{t_1}^{t_2} \frac{\sigma}{\mu} dt. \quad (7)$$

Как следует из (7), зависимость угла оплавления от температуры определяется через $\sigma(T)$ и $\mu(T) = \mu_0 \exp(E/RT)$, где E — энергия активации вязкого течения, R — универсальная газовая постоянная. Поскольку зависимость $\sigma(T)$ достаточно слабая ($d\sigma/dT \approx 0.12 \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{K}$ [7]), то можно считать, что $\sigma = \text{const}$. В случае изотермического отжига из (7) получим

$$\operatorname{ctg}^3 \alpha - \operatorname{ctg}^3 \alpha_0 = 2\pi^2 \frac{\sigma}{\mu_0 h} t \exp(-E/RT). \quad (8)$$

Как следует из (8), $\text{ctg } \alpha \sim t^{1/m}$, где $m = 3$. В аналогичном эмпирическом соотношении [2,3] по данным эксперимента для БФСС величина m составила 2.4 ± 0.8 , что в пределах возможной ошибки согласуется с полученным нами значением 3.

В процессе секундной термообработки температура подложки к окончанию светового импульса возрастает до максимальной T^* , затем быстро падает [8]. Рост T и последующее уменьшение аппроксимируются зависимостями $T(t) = T^* \sqrt{t/\tau}$ и $T(t) = T^* \sqrt{\tau/t}$ соответственно, где τ — время нагрева, т.е. длительность светового импульса. С учетом этого пределы интегрирования в (7) будут $t_1 = (T_g/T^*)^2 \tau$ и $t_2 = (T^*/T_g)^2 \tau$; T_g — температура стеклования (размягчения), при которой $\mu = 10^{13}$ Па.

В общем случае $E(T) = E_0 - TS$ [9–11], где E_0 и $S = -\partial E/\partial T$ — энтальпия и энтропия активации вязкого течения, соответственно. Если зависимость $E(T)$ аппроксимировать линейной функцией в интервале температур от T_g до T^* , т.е. считать E_0 и S усредненными параметрами, то можно найти аналитическое решение уравнения (7), описывающее изменение угла α при импульсной термообработке стекол,

$$\begin{aligned} \text{ctg}^3 \alpha - \text{ctg}^3 \alpha_0 = & 2\pi^2 \frac{\sigma}{\mu_0 h} \tau \cdot e^{S/R} \left\{ e^{-a} \left[1 - a \right. \right. \\ & + \frac{2}{a} \left(1 + \frac{1}{a} \right) \left. \right] - a^2 \cdot \text{Ei}(-a) - e^{-a_g} \left[\left(\frac{T_g}{T^*} \right)^2 (1 - a_g) \right. \\ & \left. \left. + \frac{2}{a} \left(\frac{T^*}{T_g} + \frac{1}{a} \right) \right] + a^2 \cdot \text{Ei}(-a_g) \right\}, \quad (9) \end{aligned}$$

где $a_g = E_0/RT_g$, $a = E_0/RT^*$, $-\text{Ei}(-x) = \int_1^\infty e^{-xy} y^{-1} dy$ — интегральная показательная функция.

Поскольку $E/RT \sim 30 \gg 1$, то разлагая $-\text{Ei}(-x)$ в ряд и ограничиваясь членами, пропорциональными RT/E_0 , из (9) получаем

$$\text{ctg}^3 \alpha - \text{ctg}^3 \alpha_0 = 8\pi^2 \frac{\sigma}{\mu_0 h} \frac{RT^*}{E_0} \tau \exp\left(-\frac{E_0 - T^*S}{RT^*}\right). \quad (10)$$

В конкретных расчетах по формулам (8) и (10) (рис. 2) применительно к экспериментальным данным [1] использованы значения $\mu_0 = 10^{-3}$ Па и $\sigma = 400$ эрг/см² [7]. Рассчитанные зависимости $\alpha(T)$ в случае изотермического оплавления БФСС ($t = 60$ min) достаточно хорошо согласуются с экспериментом, если $E = 300$ (кривая 1) и 280 кДж/мол (кривая 2), за исключением значений α при $T = 900^\circ\text{C}$. Температурные зависимости угла оплавления при импульсной термообработке стекол ($\tau = 10$ s) получены при $E_0 = 325$ кДж/мол и $S = 10$ Дж/мол · К (кривая 3) и $E_0 = 285$ кДж/мол и $S = 20$ Дж/мол · К (кривая 4). Экспериментальные значения $\alpha(T^*)$ весьма близки к расчетным или совпадают с ними. Следует отметить, что найденные средние значения E , E_0 и S согласуются со справочными данными для стекол разного

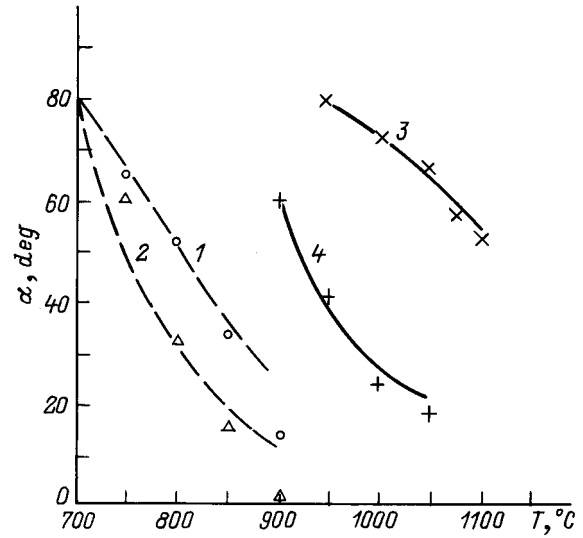


Рис. 2. Зависимость угла наклона ступенек БФСС от температуры при концентрациях легирующих примесей: 1 — 4.6% В и 3.1% Р, 2 — 5.6% В и 3.1% Р, 3 — 2.5% В и 3.6% Р, 4 — 6.3% В и 2.9% Р. Штриховые линии — изотермический отжиг, сплошные — импульсный нагрев.

состава [7]. Сравнение результатов с данными измерений подтверждают корректность полученных аналитических выражений для определения величины α .

Таким образом, проведенное исследование показывает, что полученные температурно-временные зависимости угла оплавления ступеньки ФСС (БФСС) на основе модели ньютоновского вязкого течения под действием сил поверхностного натяжения достаточно хорошо описывают процесс оплавления. Учет температурной зависимости энергии активации вязкого течения позволил получить выражение для угла оплавления при импульсном нагреве и показать, что эффективность данного процесса обусловлена динамическим уменьшением вязкости за счет энтропийного фактора.

Список литературы

- [1] Becker F.S., Pawlik D., Schäfer H., Staudigl G. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1986. Vol. 4. N 3. P. 732–744.
- [2] Mercier J.S. // Solid State Technol. 1987. Vol. 30. N 7. P. 85–90.
- [3] Васильев В.Ю., Духанова Т.Г. // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1991. № 4. С. 38–41.
- [4] White L.K., Miskowski N.A., Kurylo W.A., Shaw J.M. // J. Electrochem. Soc. 1992. Vol. 139. N 3. P. 822–826.
- [5] Thallikar G., Liao H., Cale T.S. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1995. V. 13. N 4. P. 1875–1878.
- [6] Де Жен П.Ж. // УФН. 1987. Т. 151. № 4. С. 619–681.
- [7] Мазурин О.В., Стрельцина М.В., Швайко-Швайковская Т.П. Свойства стекол и стеклообразующих расплавов. Справочник. Т. 1. Л.: Наука, 1973. 444 с.

- [8] Борисенко В.Е., Корнилов С.Н., Лабунов В.А., Кучеренко Ю.В. // Зарубежная электронная техника. 1985. Т. 6. С. 45–65.
- [9] Немилев С.В. // Физ. и хим. стекла. 1978. Т. 4. № 2. С. 129–148.
- [10] Немилев С.В., Гуткина Н.Г. // Физ. и хим. стекла. 1980. Т. 6. № 5. С. 535–542.
- [11] Мюллер Р.Л. // ЖПХ. Т. 28. № 10. С. 1077–1087.