

06

Эволюция морфологии поверхности при росте пленок поликристаллического кремния с полусферическими зёрнами

© А.В. Новак, В.Р. Новак

Национальный исследовательский университет МИЭТ, Москва,
Зеленоград
Научно-исследовательский институт физических проблем
им. Ф.В. Лукина, Зеленоград
E-mail: novak-andrei@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 декабря 2013 г.

Изучена эволюция морфологии поверхности при росте пленок поликристаллического кремния с полусферическими зёрнами (пленки HSG-Si) на основе использования скейлингового анализа изображений поверхности, полученных посредством атомно-силовой микроскопии. Из корреляционных функций высота-высота найдено, что показатель шероховатости $\alpha = 0.92 \pm 0.03$ и не зависит от толщины пленки. Получены зависимости ширины интерфейса $w(t)$, корреляционной длины $\xi(t)$ и длины волны $\lambda(t)$ от времени осаждения t и найдены скейлинговые коэффициенты β , $1/z$, p .

При получении тонких пленок кремния на основе метода химического парофазного осаждения (CVD) при особых условиях образуются пленки поликристаллического кремния с полусферическими зёрнами (пленки HSG-Si), имеющие значительную шероховатость [1–3]. Площадь поверхности таких пленок в 2 раза превышает площадь гладкой поверхности. Пленки HSG-Si используются в микроэлектронике в конденсаторах хранения элементов динамической памяти (DRAM) [4], а также представляют интерес для применения в элементах энергозависимой памяти (NVM) [5], в структурах на основе кремниевых наночастиц [6], в микроэлектромеханических системах (MEMS) [7].

Морфология поверхности пленок HSG-Si, в частности размер и плотность зёрен, существенно зависит от условий формирования (температуры, давления и времени осаждения, температуры и времени отжига) [1–3]. Для контролируемого получения пленок HSG-Si с заданными свойствами поверхности представляется необходимым изуче-

ние влияния условий формирования и роста пленок на морфологию поверхности. Ранее в [3] на основе использования атомно-силовой микроскопии (АСМ) изучены зависимости основных параметров, количественно характеризующих морфологию поверхности пленок HSG-Si, от температуры осаждения, которая является одним из наиболее критических параметров при формировании пленок. В настоящее время для количественного описания морфологии поверхности, а также эволюции морфологии поверхности при росте пленок, широко используется скейлинговый подход, основанный на анализе корреляционных функций АСМ-изображений поверхности [8–11]. Этот подход использовался нами при сравнительном изучении морфологии пленок HSG-Si, пленок аморфного и поликристаллического кремния [12].

В данной работе изучается эволюция морфологии поверхности при росте пленки HSG-Si на основе использования скейлингового подхода, посредством анализа корреляционных функций высота-высота, рассчитанных для АСМ-изображений поверхности пленок HSG-Si, имеющих различную толщину.

Получение пленок HSG-Si производили на основе метода химического парового осаждения при низком давлении (LPCVD) при условиях, обеспечивающих формирование пленок с большой площадью поверхности [3]. Температура осаждения и отжига составляла 583°C , давление осаждения 0.2 Torr, время отжига в вакууме — 20 min. Время осаждения t варьировали в интервале от 3 до 33 min, что позволило получить набор пленок с разными толщинами d в интервале от 30 до 160 nm. Измерение АСМ-изображений производили посредством микроскопа Солвер Р47, NT-MDT, таким же образом, как в работе [3]. Математическая обработка АСМ-изображений производилась при помощи программного пакета „Image Analysis P9“ (NT-MDT).

В скейлинговом анализе используют корреляционные функции высота-высота $H(\mathbf{r}, t)$, соответствующие пленкам с различными значениями времени роста t . Корреляционная функция высота-высота определяется как $H(\mathbf{r}) = \langle [Z(\mathbf{r}') - Z(\mathbf{r}' - \mathbf{r})]^2 \rangle$ [8–11], где скобки означают усреднение по всем парам точек, отстоящим одна от другой на фиксированный вектор сдвига \mathbf{r} , по выборочной площади S , $Z(\mathbf{r}) = Z(x, y)$ — функция высоты поверхности пленки, отсчитанная от базовой плоскости. Кроме функции $H(\mathbf{r})$ также используют автокорреляционную функцию $R(\mathbf{r}) = \langle Z(\mathbf{r}')Z(\mathbf{r}' - \mathbf{r}) \rangle$ и функцию спектральной плотности мощности PSD (\mathbf{q}), которая является фурье-преобразованием от $R(\mathbf{r})$.

Функции $H(\mathbf{r})$ и $R(\mathbf{r})$ связаны соотношением $H(\mathbf{r}) = 2w^2 - 2R(\mathbf{r})$ [10], где $w = (\langle [Z(\mathbf{r}) - \langle Z(\mathbf{r}) \rangle]^2 \rangle)^{1/2}$ называют шириной интерфейса, а также среднеквадратической шероховатостью поверхности, $w \equiv S_q$. Для статистически изотропных поверхностей $H(\mathbf{r})$ и $R(\mathbf{r})$ зависят только от модуля \mathbf{r} . Поверхность многих пленок описывается моделью самоаффинного скейлинга, а для описания эволюции интерфейса поверхности при росте используют приближение динамического самоаффинного скейлинга [8–11]. В этом случае $H(r, t) \sim r^{2\alpha}$ при $r \ll \xi(t)$ и $H(r, t) \approx 2w(t)^2$ при $r \gg \xi(t)$, где α — показатель шероховатости, $\xi(t)$ — латеральная корреляционная длина, которая определяет верхнюю границу области самоаффинности и является характеристикой нерегулярности поверхности в латеральном направлении. Ширина интерфейса $w(t)$ является характеристикой нерегулярности поверхности в вертикальном направлении, ее также называют корреляционной длиной в вертикальном направлении [11]. Ширина интерфейса $w(t)$ и корреляционная длина $\xi(t)$ имеют степенную зависимость от времени роста t : $w(t) \sim t^\beta$, $\xi(t) \sim t^{1/z}$, где β — коэффициент роста, z — динамический коэффициент. Для существования динамического скейлинга необходимо выполнение условия $z = \alpha/\beta$ [10]. Изучению динамики роста посвящено множество работ, и разработаны различные теоретические модели, которые связывают конкретные механизмы роста со скейлинговыми коэффициентами α , β , z [10,11,13].

На рис. 1 приведен ряд характерных АСМ-изображений пленок HSG-Si, соответствующих разному времени осаждения и имеющих разную толщину. Из расчетов найдено, что при росте толщины пленки от 30 до 160 nm размер зерен увеличивается с 64 до 170 nm.

На рис. 2 представлены графики корреляционных функций $H(r)$ для пленок, соответствующих разным значениям времени осаждения и имеющих разные толщины. Функции $H(r)$ получали усреднением 4 зависимостей $H(r) \approx G_S(x)$ [8], соответствующих различным АСМ-изображениям.

Величина показателя шероховатости α , определенная из наклона начального участка $H(r)$, имеет одинаковое значение $\alpha = 0.92 \pm 0.03$ для всех пленок. Полученная величина совпадает с данными для пленок LPCVD аморфного и поликристаллического кремния ($\alpha = 0.92 \pm 0.03$) [12] и является близкой к значению для пленок аморфного кремния, полученных термическим испарением ($\alpha = 0.9 \pm 0.02$) [14]. Начальные участки на $H(r)$ для всех толщин

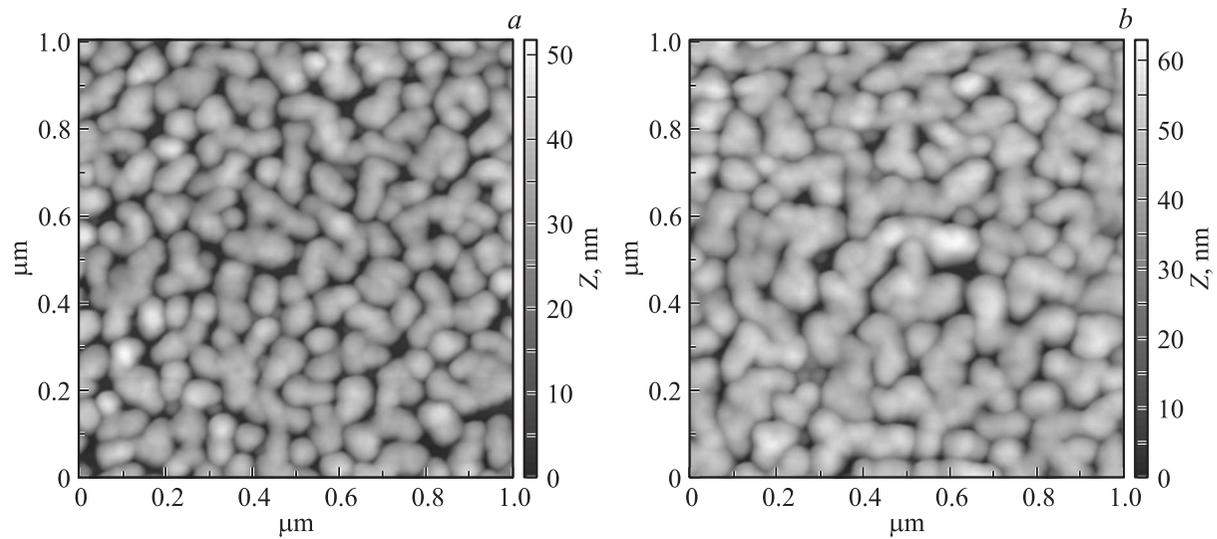


Рис. 1. АСМ-изображения пленок HSG-Si, соответствующих разному времени осаждения t : a — 3, b — 5, c — 10, d — 16 min, и имеющих толщину: 30, 40, 67, 96 nm соответственно.

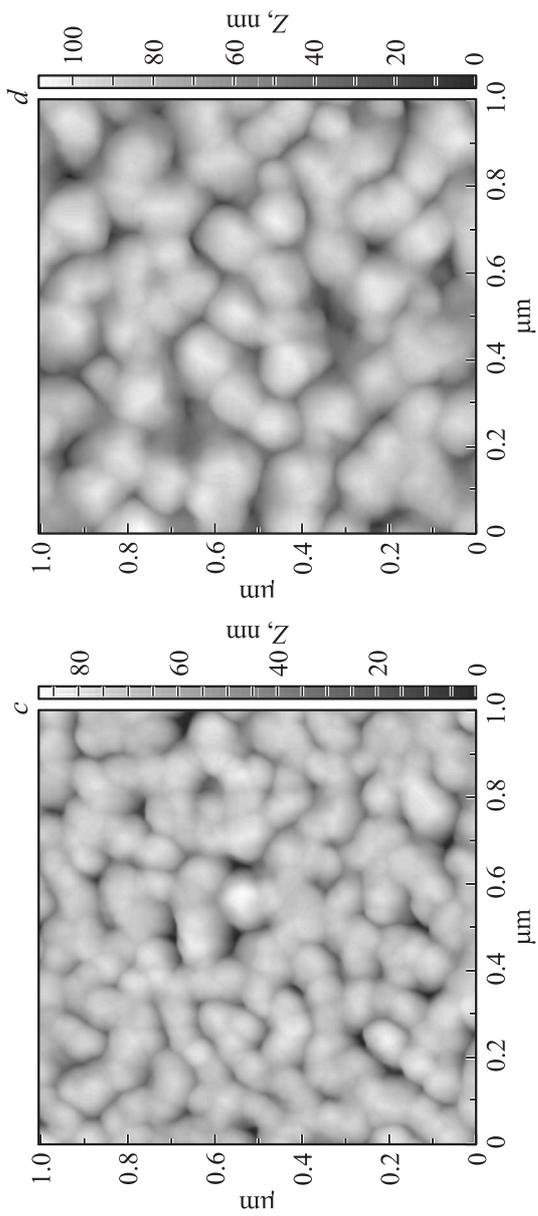


Рис. 1 (продолжение).

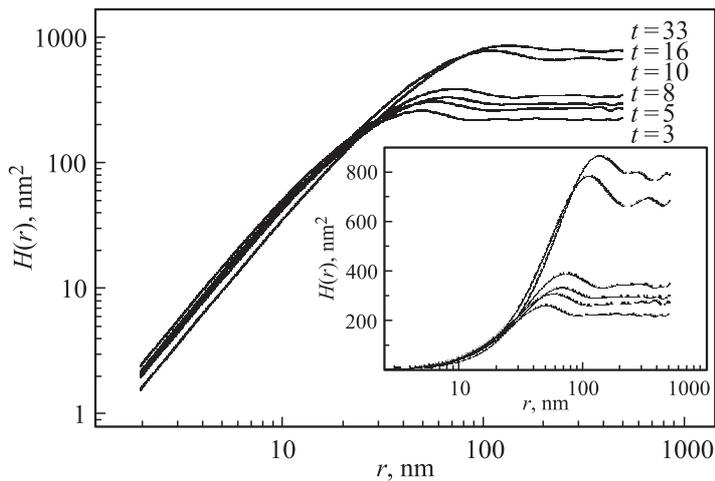


Рис. 2. Корреляционные функции $H(r)$ для пленок, соответствующих разным значениям времени осаждения t : 3, 5, 8, 10, 16, 33 min (и имеющих толщины: 30, 40, 59, 67, 96, 160 nm).

практически совпадают. Из этого следует, что локальный наклон поверхности в процессе роста остается постоянным, т. е. рост является стационарным [10]. На зависимостях $H(r)$ для всех пленок при $r > \xi$ можно заметить наличие осцилляций, которые лучше видны на графике, построенном в полулогарифмическом масштабе (вставка на рис. 2), а на соответствующих функциях спектральной плотности мощности $PSD(q)$ наблюдается характерный максимум. Такое поведение функций $PSD(q)$ и $H(r)$ указывает на то, что поверхность пленок HSG-Si обладает свойствами „холмообразной“ поверхности, с регулярным расположением холмов [8–10]. В случае холмообразной поверхности появляется еще один характерный параметр — длина волны λ , которая соответствует среднему расстоянию между „холмами“. Холмообразные поверхности образуются при молекулярно-лучевой эпитаксии (МБЕ) [10], а также при использовании методов PVD (физическое парофазное осаждение) и CVD [9]. При осаждении методами PVD и CVD доминирующими являются такие нелокальные эффекты, как „затенение“ падающего потока частиц более высокими участками поверхности и „реземиссия“ — перераспределение частиц, отраженных от поверхности [9,10].

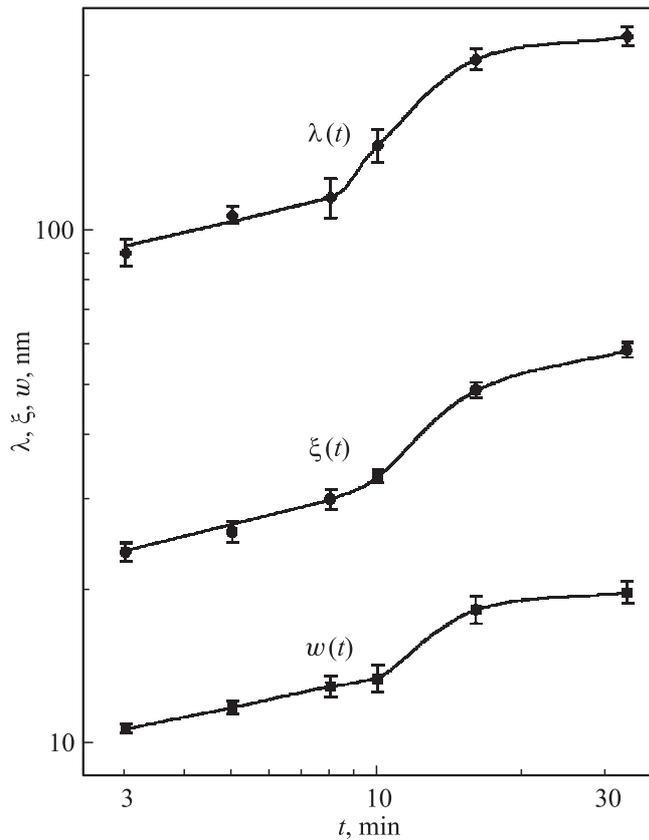


Рис. 3. Зависимости ширины интерфейса $w(t)$, латеральной корреляционной длины $\xi(t)$ и длины волны $\lambda(t)$ от времени осаждения t .

На полученных зависимостях ширины интерфейса $w(t)$, латеральной корреляционной длины $\xi(t)$ и длины волны $\lambda(t)$ от времени осаждения t (рис. 3) можно выделить 3 временных интервала, которым соответствуют различные значения скейлинговых коэффициентов β , $1/z$, p . На начальном интервале t (3–10 min), соответствующем росту толщины d от 30 до 67 nm, ширина интерфейса зависит от времени, как $w \sim t^\beta$, где $\beta = 0.19 \pm 0.05$, корреляционная длина, как $\xi \sim t^{1/z}$, где $1/z = 0.24 \pm 0.04$, и длина волны, как $\lambda \sim t^p$, где $p = 0.25 \pm 0.04$.

Теоретические модели МВЕ роста за счет поверхностной диффузии дают: $\alpha = 1$, $\beta = 0.25$ (с учетом линейных членов в уравнении роста) и $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.2$, $1/z = 0.3$ (с учетом нелинейных членов) [10,13,15]. Полученное значение $\beta = 0.19 \pm 0.05$ указывает на то, что в процессе роста пленки преобладает механизм поверхностной диффузии, что согласуется с принятыми представлениями о механизме формирования пленок HSG-Si [1,2]. На втором интервале t (10–16 min), соответствующем росту d от 67 до 96 nm, происходит изменение скейлинговых коэффициентов ($\beta = 0.66 \pm 0.14$, $1/z = 0.82 \pm 0.14$ и $p = 0.79 \pm 0.15$), что указывает на изменение механизма формирования рельефа. Так как имеет место увеличение показателя роста ($\beta \approx 0.66$), то можно предположить, что при формировании рельефа усиливается влияние эффекта затенения [9,10]. Для $t > 16$ min, соответственно при $d > 96$ nm, происходит изменение скейлинговых коэффициентов: $\beta < 0.13$, $1/z < 0.3$ и $p < 0.18$. Можно предположить, что в этом случае более существенную роль играет эффект реэмиссии, приводящий к уменьшению β [9,10].

Из найденных скейлинговых коэффициентов следует, что в случае пленок HSG-Si, которые являются холмообразными, при толщинах менее 96 nm выполняется условие динамического скейлинга ($1/z \approx \beta/\alpha$). Так, $\beta/\alpha = 0.21 \pm 0.05$ и $1/z = 0.24 \pm 0.04$ (для 3–10 min) и $\beta/\alpha = 0.7 \pm 0.15$ и $1/z = 0.82 \pm 0.14$ (для 10–16 min). Согласно [10] для холмообразной поверхности условие динамического скейлинга ($1/z = \beta/\alpha$) может выполняться только в случае, когда корреляционная длина $\xi(t) \sim t^{1/z}$ и длина волны $\lambda(t) \sim t^p$ одинаковым образом зависят от времени t . Оказалось, что в нашем случае это условие выполняется, так как $1/z \approx p$.

Таким образом, для пленок HSG-Si найдено, что показатель шероховатости $\alpha = 0.92 \pm 0.03$ и не зависит от толщины пленки, локальный наклон поверхности не меняется с ростом толщины. Динамика роста при толщине менее 67 nm характеризуется скейлинговыми коэффициентами: $\beta = 0.19 \pm 0.05$, $1/z = 0.24 \pm 0.04$, $p = 0.25 \pm 0.05$, что согласуется с моделью роста за счет поверхностной диффузии. При толщине 67–96 nm показатель роста увеличивается ($\beta \approx 0.66$), а затем при толщине > 96 nm уменьшается ($\beta < 0.13$). Обнаружено, что выполняется условие динамического скейлинга ($1/z \approx \beta/\alpha$) и корреляционная длина $\xi(t)$ и длина волны $\lambda(t)$ одинаковым образом зависят от времени.

Список литературы

- [1] *Watanabe H., Aoto N., Adachi S.* et al. // *J. Appl. Phys.* 1992. V. 71. N 7. P. 3538–3543.
- [2] *Ino M., Miyano J., Kurogi H.* et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 1996. V. 14. N 2. P. 751–756.
- [3] *Новак А.В., Никольский Ю.В., Фокичев С.Н.* // *Письма в ЖТФ.* 2012. Т. 38. В. 16. С. 1–8.
- [4] *Gerritsen E., Emonet N., Caillat C.* et al. // *Solid State Electron.* 2005. V. 49. P. 1767–1775.
- [5] *Chen J.-H., Lei T.-F., Landheer D.* et al. // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2007. V. 46. P. 6586–6588.
- [6] *Sun E., Su F.H., Chen C.H., Chen M.J.* // *Appl. Surf. Sci.* 2010. V. 256. N 16. P. 5021–5024.
- [7] *Kuo H.P., Lam S., Sheng X.* et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2006. V. 24. N 2. P. 1030–1034.
- [8] *Yang H.-N., Zhao Y.-P., Chan A.* et al. // *Phys. Rev. B.* 1997. V. 56. N 7. P. 4224–4232.
- [9] *Pelliccione M., Karabacak T., Gaire C.* et al. // *Phys. Rev. B.* 2006. V. 74. P. 125 420.
- [10] *Pelliccione M., Lu T.-M.* // *Evolution of Thin Film Morphology. Modeling and Simulation.* New York: Springer, 2008.
- [11] *Meakin P.* // *Fractals scaling and growth far from equilibrium.* Cambridge University Press, 1998.
- [12] *Новак А.В., Новак В.Р.* // *Письма в ЖТФ.* 2013. Т. 39. В. 19. С. 32–39.
- [13] *Barabasi A.-L., Stanley H.E.* // *Fractal concepts in surface growth.* Cambridge, England: Cambridge University Press, 1995.
- [14] *Yang H.-N., Zhao Y.-P.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1996. V. 76. N 20. P. 3774–3777.
- [15] *Lai Z.-W., Das Sarma S.* // *Phys. Rev. Lett.* 1991. V. 66. N 18. P. 2348–2351.