

05;11

Исследование морфологии пленок поликристаллического кремния с шероховатой поверхностью

© А.В. Новак, Ю.В. Никольский, С.Н. Фокичев

Национальный исследовательский университет МИЭТ, Зеленоград
ОАО „Ангстрем“, Зеленоград
E-mail: novak-andrei@mail.ru

Поступило в Редакцию 26 марта 2012 г.

Посредством атомно-силовой микроскопии (АСМ) изучена зависимость морфологии пленок поликристаллического кремния с шероховатой поверхностью, полученных методом химического парофазного осаждения при низком давлении (LPCVD), от температуры осаждения. Для температурного интервала, в котором происходит образование пленок поликристаллического кремния с шероховатой поверхностью, получены зависимости относительного приращения площади поверхности, плотности, среднего размера и средней высоты зерен, среднеквадратической шероховатости и корреляционной длины от температуры осаждения.

Пленки поликристаллического кремния с шероховатой поверхностью [1,2], называемые также пленками поликристаллического кремния с полусферическими зёрнами (HSG-Si) [3,4], состоят из плотно упакованных зерен размерами в несколько десятков нанометров и имеют развитую поверхность, площадь которой в 1.5–2.0 раза больше площади поверхности „гладких“ пленок. Пленки HSG-Si используются в интегральных конденсаторных структурах, в частности в элементах динамической памяти (DRAM), в качестве нижнего электрода конденсатора хранения, что позволяет увеличить емкость, приходящуюся

на единицу площади элемента более чем в 2 раза по сравнению с „гладким“ электродом из поликристаллического кремния [5,6]. Кроме того, пленки HSG-Si представляют интерес для различных применений в микроэлектромеханических системах (MEMS) [7,8], а пленки с малым размером зерен (1–20 nm) интересны для формирования структур на основе кремниевых наноточек [9,10].

С точки зрения использования пленок HSG-Si как в конденсаторных структурах, так и для других применений наиболее важными характеристиками пленок HSG-Si являются величина приращения площади поверхности (по сравнению с гладкой пленкой), размер и плотность зерен.

Пленки HSG-Si получают на основе метода химического парового осаждения при низком давлении (LPCVD) из моносилана, при специальных условиях формирования (температуре, давлении и времени осаждения, температуре и времени отжига) [1–4,11]. Температура осаждения является одним из наиболее критических параметров, поскольку образование пленок с большой площадью поверхности происходит в очень узком температурном интервале ($\sim 6^\circ\text{C}$) [1–4], лежащем при переходе от смешанных пленок, состоящих из аморфной и поликристаллической фазы, к поликристаллическим пленкам с „гладкой“ поверхностью [2]. Причем в различных работах приведены разные значения оптимальной температуры осаждения при примерно одинаковых прочих параметрах формирования [1–4,11]. Изучение зависимости морфологии пленок HSG-Si от условий формирования проводилось в основном методами электронной микроскопии [1–4], а в работах [11,12] — методами атомно-силовой микроскопии. Однако полученные при этом зависимости таких характеристик, как размер и плотность зерен, имеют качественный характер, а размеры зерен приведены только для некоторых значений параметров осаждения.

Целью данной работы является изучение зависимости морфологии пленок HSG-Si, получаемых методом LPCVD, от температуры осаждения с помощью метода сканирующей атомно-силовой микроскопии.

Пленки HSG-Si получали методом LPCVD в трубчатом горизонтальном реакторе (ASM-LPCVD) при разложении моносилана (SiH_4). Осаждение производили на кремниевые пластины КДБ (100) со слоем термического окисла толщиной 35 nm. С целью поиска температурного интервала образования пленок HSG-Si температуру осаждения T_d варьировали от 560 до 620°C. Давление моносилана при осаждении было

фиксированным и составляло 0.2 Torr, что соответствует оптимальной величине в большинстве опубликованных работ. Толщина осаждаемой пленки, определяемая временем осаждения, варьировалась в интервале от 50 до 160 nm. После осаждения пленки выдерживались 20 min при температуре, равной температуре осаждения.

Толщины осажденных пленок определяли посредством рефлектометра Leitz MPV-SP, а также при помощи электронного микроскопа на сколе пластины. Морфологию изучали при помощи атомно-силового микроскопа Солвер Р47 (компания NT-MDT, г. Зеленоград). При получении АСМ-изображений использовался полуконтактный режим измерения, амплитуда колебаний зонда составляла 5–10 nm, использовались кантилеверы NSG_01. Математическая обработка полученных АСМ-изображений производилась при помощи программного пакета „Image Analysis P9“ (NT-MDT).

Из анализа морфологии пленок, осажденных при разных температурах в интервале 560–620°C с шагом $\sim (5-10)^\circ\text{C}$, было найдено приблизительное положение температурного интервала, в котором происходит образование пленок HSG-Si. Далее было проведено подробное изучение морфологии пленок, имеющих одинаковую толщину (95 ± 8 nm), в температурном интервале 571–595°C, полностью содержащем область, в которой происходит образование пленок HSG-Si. На рис. 1 приведен ряд характерных АСМ-изображений пленок, осажденных при различных температурах из указанного интервала, которые наглядно демонстрируют, как с изменением температуры осаждения меняется морфология пленок. При анализе АСМ-изображений, представляющих собой функции высоты поверхности $Z(x, y)$, отсчитанной от базовой плоскости XY , рассчитывали: величину относительного приращения площади поверхности (S_{dr}) [13], плотность (N_g) и средний латеральный размер (D_g) зерен, среднюю высоту зерен (Z_g), среднеквадратическую шероховатость поверхности (S_q) [13], автокорреляционную функцию (ACF) [13], из которой определяли корреляционную длину (L_c). Размер отдельного зерна определяли как диаметр окружности, площадь которой равна площади, приходящейся на зерно. Из плотности зерен (N_g) определяли среднее расстояние между зернами $L_g = (1/N_g)^{1/2}$. Полученные в результате расчетов зависимости D_g и L_c от температуры осаждения приведены на рис. 2, *a*. Зависимости N_g и отношение среднего расстояния между зернами к среднему размеру зерен (L_g/D_g) приведены на рис. 2, *b*. Отношение

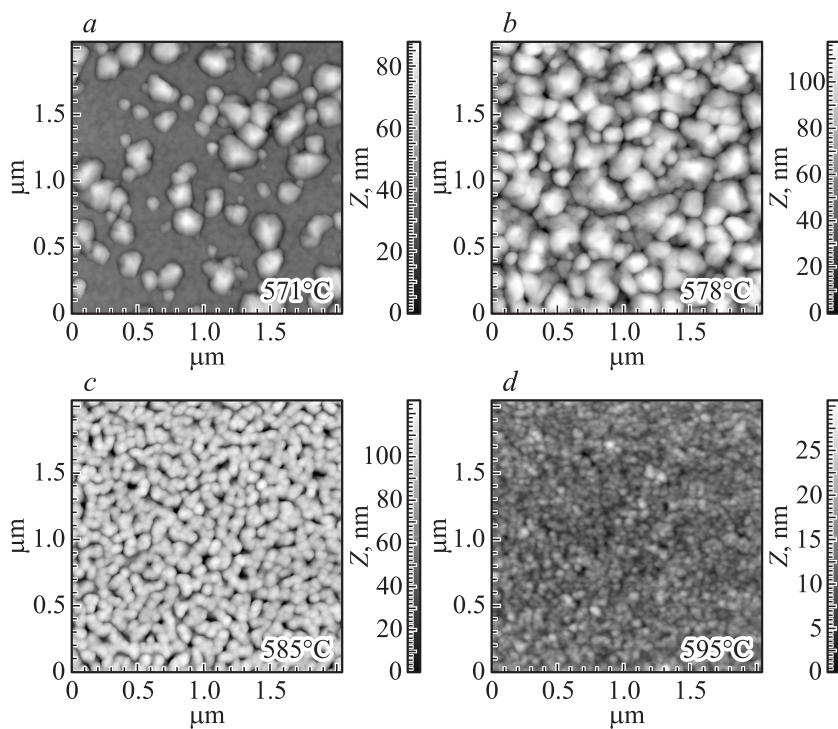


Рис. 1. АСМ-изображения пленок, осажденных при различных температурах T_d : *a* — 571°C, *b* — 578°C, *c* — 585°C, *d* — 595°C.

L_g/F_g можно использовать в качестве параметра, характеризующего плотность упаковки зерен в пленке. Температурная зависимость S_{dr} приведена на рис. 2, *c*. Проводилась оценка влияния эффекта увеличения латеральных размеров зерен, обусловленная неидеальностью зонда, на основе использования операции деконволюции, реализацию которой обеспечивал программный модуль „Deconvolution“ (NT-MDT). Разница между латеральными размерами, полученными для АСМ-изображений без и с применением операции деконволюции, составляла менее 7%, что находится в пределах погрешностей, приведенных в графиках на рис. 2.

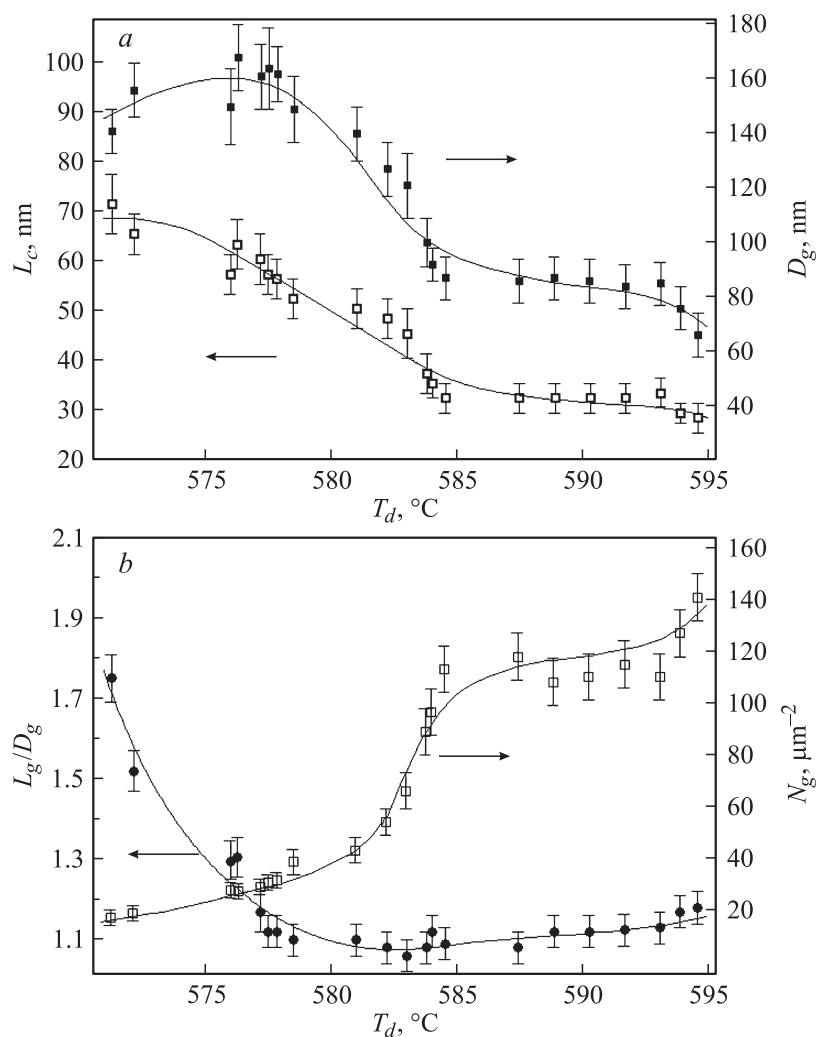


Рис. 2. Зависимости от температуры осаждения T_d : *a* — корреляционной длины L_c и среднего размера зерен D_g , *b* — отношения среднего расстояния между зернами к среднему размеру зерен L_g/D_g и плотности зерен N_g , *c* — относительного приращения площади поверхности S_{dr} .

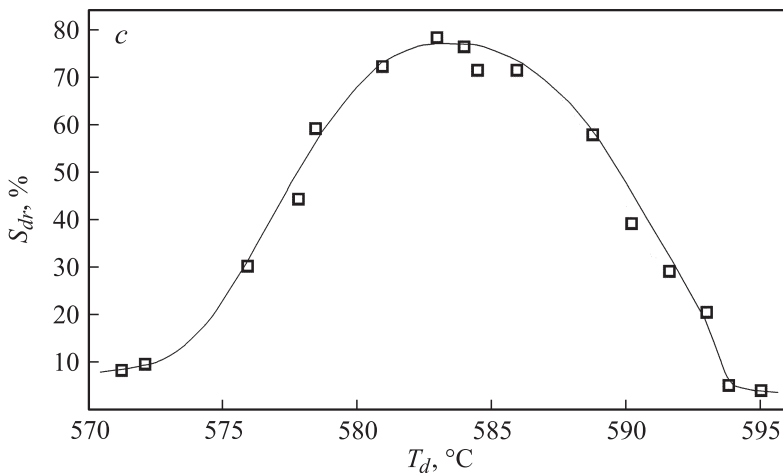


Рис. 2 (продолжение).

В исследованном температурном интервале ($571\text{--}595^\circ\text{C}$) можно выделить несколько характерных температурных областей. В первой области, соответствующей $571^\circ\text{C} < T_d < 578^\circ\text{C}$, осажденная пленка является смешанной, состоящей из кристаллических зерен, включенных в аморфную пленку. При этом с увеличением температуры площадь аморфных участков убывает и при $T_d = 578^\circ\text{C}$ осажденный слой полностью состоит из зерен полусферической формы. Это видно из АСМ-изображений поверхности (рис. 1), а также из зависимости отношения L_g/D_g (рис. 2, *b*), на которой при увеличении температуры до 578°C L_g/D_g убывает до 1.1, а затем практически остается постоянной, равной 1.08 ± 0.04 , при дальнейшем увеличении температуры. При увеличении температуры от 571 до 578°C : D_g изменяется незначительно (рис. 2, *a*), возрастая от 140 до 160 nm; L_c убывает с 71 до 56 nm; S_q возрастает от 11 до 19 nm, Z_g увеличивается от 50 до 92 nm, S_{dr} при приближении к $T_d = 578^\circ\text{C}$ начинает расти и достигает 60% (рис. 2, *c*).

При $578^\circ\text{C} < T_d < 584^\circ\text{C}$ происходит рост N_g от 40 до $110\ \mu\text{m}$ (рис. 2, *b*), D_g уменьшается в два раза от 160 до 80 nm (рис. 2, *a*), L_c убывает от 56 до 32 nm, величина S_{dr} продолжает увеличиваться и достигает максимального значения $\sim 80\%$ при $T_d(583\text{--}584)^\circ\text{C}$ (рис. 2, *c*),

S_q является максимальной и составляет 18–19 nm, Z_g также является максимальной и составляет 90–108 nm.

При $584^\circ\text{C} < T_d < 594^\circ\text{C}$ величины N_g и D_g , L_c , отношение L_g/D_g практически не меняются и составляют: $N_g \sim 110\text{--}120 \mu\text{m}^{-2}$, $D_g \sim 80\text{--}90 \text{ nm}$, $L_c \sim 3 \pm 3$. В то же время S_q монотонно убывает от 18 до 9 nm, а Z_g от 105 до 50 nm, величина S_{dr} также убывает и достигает значения $\sim 20\%$ при $T \sim 593^\circ\text{C}$ (рис. 2, *c*). Убывание S_q , Z_g , S_{dr} связано с тем, что с ростом температуры осаждения зерна начинают все больше срастаться друг с другом.

При температуре 594°C происходит резкий переход от пленок HSG-Si к пленкам поликристаллического кремния с „гладкой“ поверхностью. Так, при увеличении температуры от 593 до 594°C резко уменьшаются: S_q от 9 до 3 nm, Z_g от 50 до 15 nm, величина S_{dr} от 20 до 5%. Этот переход виден и на АСМ-изображениях (рис. 1), если пленки HSG-Si состоят из отдельных зерен, то пленки поликристаллического кремния с „гладкой“ поверхностью состоят из полностью сросшихся зерен, при этом распределение зерен по размеру и высоте совершенно другое, чем в случае пленок HSG-Si.

В исследованном температурном интервале ($571\text{--}595^\circ\text{C}$) изменяются не только плотность и средний латеральный размер зерен, но и форма. Так, отношение средней высоты к среднему размеру Z_g/D_g составляет: 0.45 (571°C); 0.6 (578°C); 0.9 (583°C); 0.24 (595°C).

Таким образом, найдено, что образование пленок поликристаллического кремния с шероховатой поверхностью происходит при температуре осаждения, лежащей в интервале от 578 до 593°C , давлении 0.2 Torr и времени отжига 20 min, при толщине пленок $\sim 95 \pm 8 \text{ nm}$. Обнаружено, что переход от пленок HSG-Si к пленкам поликристаллического кремния с „гладкой“ поверхностью является резким. При этом переходе величина S_q уменьшается до 3 nm, средняя высота зерен от 50 до 15 nm, величина S_{dr} от 20 до 5%. В то время как при переходе от „смешанных пленок“ к пленкам HSG-Si нет резкого изменения величин S_q , средней высоты зерен Z_g , S_{dr} . Найдено, что пленки, осажденные при температуре $584 \pm 2^\circ\text{C}$, имеют максимальную величину относительного приращения площади поверхности $S_{dr} \sim 80\%$, среднеквадратической шероховатости $S_q \sim 18 \text{ nm}$ и отношения средней высоты к среднему размеру $Z_g/D_g \sim 1.0$.

Список литературы

- [1] *Ino M., Miyano J., Kurogi H., Tamura H., Nagatomo Y., Yoshimaru M.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 1996. V. 14. N 2. P. 751–756.
- [2] *Banerjee A., Crenshaw D.L., Wise R.* et al. // J. Electrochemical Society. 1999. V. 146. N 6. P. 2289–2293.
- [3] *Watanabe H., Aoto N., Adachi S.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. N 3. P. 251–253.
- [4] *Watanabe H., Aoto N., Adachi S.* et al. // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. N 7. P. 3538–3543.
- [5] *Gerritsen E., Emonet N., Caillat C.* et al. // Solid State Electronics. 2005. V. 49. P. 1767–1775.
- [6] U.S. Patent N. 6,831,315 B2 (Dec. 14, 2004).
- [7] *Suzuki K.* // Sensors and Actuators A: Physical. 2000. V. 79. N 2. P. 141–146.
- [8] *Kuo H.P., Lam S., Sheng X.* et al. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2006. V. 24. N 2. P. 1030–1034.
- [9] *Akazawa H.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. N 9. P. 1464–1466.
- [10] *Sun E., Su F.H., Chen C.H., Chen M.J.* // Appl. Surf. Sci. 2010. V. 256. N 16. P. 5021–5024.
- [11] *Strauer Y.E., Scorth M., Sweeney J.J.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1997. V. 15. N 3. P. 1007–1013.
- [12] *Edrei R., Shauly E.N.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2000. V. 18. N 18. P. 41–47.
- [13] *Blunt L., Jiang X.* // Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards „surfstand“. London: Kogan Page Science, 2003.