

06;07;13

## **Шероховатость пленок аморфного, поликристаллического кремния и поликристаллического кремния с полусферическими зернами**

© 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 14 мая 2013 г.*

Изучены шероховатость, пространственные и корреляционные свойства поверхности для трех характерных типов LPCVD пленок кремния: аморфных и поликристаллических, имеющих относительно „гладкую“ поверхность, и поликристаллических пленок с полусферическими зернами (HSG-Si), имеющих значительную шероховатость поверхности, посредством атомно-силовой микроскопии. Из анализа корреляционной функции и функции спектральной плотности мощности найдено, что для описания морфологии пленок аморфного и поликристаллического кремния подходит модель самоаффинной поверхности, тогда как для HSG-Si пленок — модель „холмообразной“ поверхности.

Пленки кремния, получаемые на основе метода химического парофазного осаждения при низком давлении (LPCVD), широко используются в микроэлектронике и различных микроэлектромеханических системах (MEMS) [1]. Значительную роль с точки зрения применения пленок играет шероховатость поверхности. Для многих применений необходимы пленки, имеющие небольшую шероховатость. В некоторых случаях необходимы пленки, имеющие значительную шероховатость, например в элементах динамической памяти (DRAM), в которых используются поликристаллические пленки с полусферическими зернами (HSG-Si) с большой площадью поверхности [2].

При LPCVD осаждении пленок кремния в зависимости от температуры и давления образуются несколько типов пленок с характерной,

четкоопределенной поверхностной морфологией и микроструктурой [3]: при низких температурах (менее  $\sim 550^\circ\text{C}$ ) и при высоких температурах (более  $\sim 590^\circ\text{C}$ ) образуются соответственно аморфные и поликристаллические пленки, которые имеют сравнительно гладкую поверхность; в переходной температурной области образуются пленки, состоящие из аморфной и поликристаллической фазы. Кроме того, в переходной области, в узком температурном интервале ( $\sim 6^\circ\text{C}$ ) и специальных условиях, образуются HSG-Si пленки, имеющие значительную шероховатость [3–5].

Ранее морфология поверхности LPCVD пленок кремния изучалась методами электронной и атомно-силовой микроскопии (АСМ), и были определены такие характеристики поверхности, как среднеквадратическая и арифметическая шероховатости, средний размер зерен [5–8]. В то же время для изучения шероховатости и корреляционных свойств поверхности пленок широко используется скейлинговый подход, основанный на анализе корреляционной функции [9–11]. Этот подход использовался при изучении пленок аморфного кремния, полученных термическим испарением [9], и LPCVD пленок поликристаллического кремния [12].

В данной работе на основе использования АСМ изучаются шероховатость, пространственные и корреляционные свойства поверхности для трех характерных типов LPCVD пленок кремния: аморфных, „гладких“ поликристаллических и HSG-Si пленок.

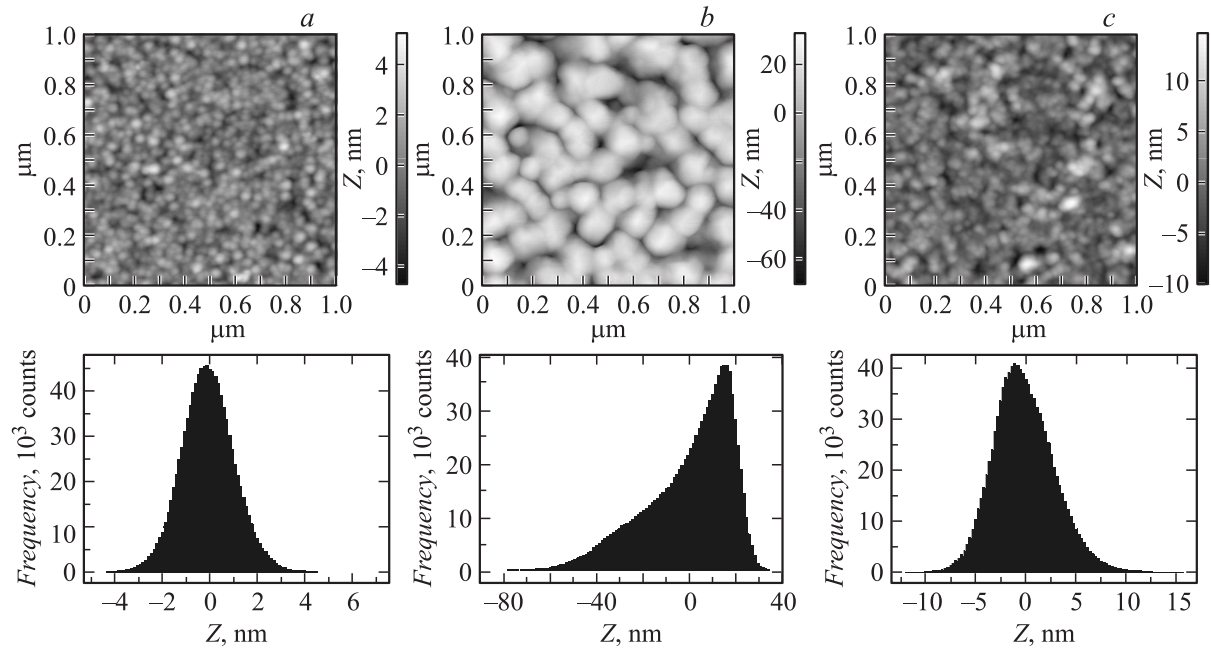
Получение LPCVD пленок кремния и измерение их характеристик (толщины и АСМ-изображений) производили таким же образом, как описано нами ранее в [5]. Пленки аморфного кремния (*a*-Si) осаждали при температуре —  $550^\circ\text{C}$ , поликристаллического кремния (poly-Si) с „гладкой“ поверхностью —  $590^\circ\text{C}$ . Пленки HSG-Si с большой площадью поверхности ( $S_{dr} \sim 80\%$ ,  $S_{dr}$  — относительное приращение площади поверхности [13]) осаждали при температуре  $584^\circ\text{C}$ , что соответствует условиям, найденным ранее [5]. Математическая обработка АСМ-изображений осуществлялась при помощи программного пакета Image Analysis P9 (NT-MDT). При анализе АСМ-изображений, представляющих функции высоты поверхности  $Z(x_i, y_j)$ , отсчитанной от базовой плоскости  $XY$ , рассчитывали: гистограммы распределения высот поверхности, автокорреляционную функцию [10,14], корреляционную функцию высота-высота [9], функцию спектральной плотно-

сти мощности (PSD), а также параметры, определяемые стандартами ISO 25178-2:2012 [14] и ASME В 46.1-2009 [15].

На рис. 1 представлены фрагменты АСМ-изображений пленок *a*-Si, HSG-Si и poly-Si, а также соответствующие этим пленкам гистограммы распределения высот поверхности, рассчитанные для АСМ-изображений размерами  $2 \times 2 \mu\text{m}$ . Все пленки имели одинаковую толщину  $\sim 95 \pm 10 \text{ nm}$ . В таблице приведены основные статистические параметры, рассчитанные для АСМ-изображений с одинаковой выборочной площадью ( $2 \mu\text{m}^2$ ,  $1024 \times 1024$  точек) и усредненные по 5 изображениям.

Найдено, что гистограммы распределения высот поверхности для пленок *a*-Si, poly-Si и HSG-Si существенно отличаются. Гистограмма для пленки *a*-Si имеет форму, наиболее близкую к гауссовой (рис. 1, *a*). В этом случае параметр  $S_{sk}$ , характеризующий асимметрию распределения, практически равен нулю (см. таблицу). Гистограмма для HSG-Si пленки (рис. 1, *b*) наиболее сильно отличается от гауссова распределения. Наблюдается длинный „левый хвост“, т. е. имеет место значительная отрицательная асимметрия распределения (параметр  $S_{sk} = -0.91$ ). Гистограмма для poly-Si с „гладкой“ поверхностью (рис. 1, *c*) также отличается от гауссова, но в этом случае наблюдается положительная асимметрия (небольшой „правый хвост“, параметр  $S_{sk} = 0.375$ ).

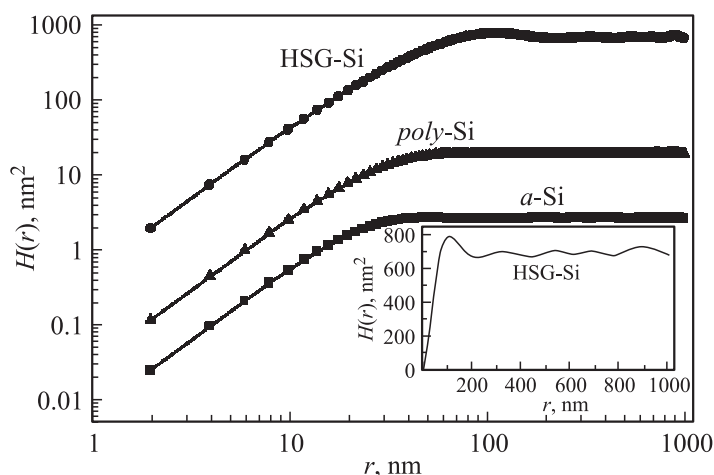
Приведенные в таблице параметры  $S_q$ ,  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ , называемые амплитудными [13] или высотными параметрами [15,16], служат для характеристики нерегулярности поверхности в вертикальном направлении. Традиционными параметрами, используемыми для характеристики шероховатости, являются:  $S_q$  — среднеквадратическая шероховатость и  $S_a$  — арифметическая шероховатость. Наибольшую шероховатость имеют HSG-Si пленки ( $S_q = 18.6 \text{ nm}$ ,  $S_a = 15.1 \text{ nm}$ ), наименьшую — пленки *a*-Si ( $S_q = 1.15 \text{ nm}$ ,  $S_a = 0.91 \text{ nm}$ ). Параметр  $S_z$  ( $\equiv S_t$ ) — максимальная высота рельефа поверхности, определяемая как разность высот между самой высокой и самой низкой точками поверхности на выборочной площади. Этот параметр соответствует толщине поверхностного слоя, заключенного между плоскостями, проходящими через самую низкую и самую высокую точки поверхности. Ниже этого слоя лежит сплошной материал. Таким образом,  $S_z$  можно рассматривать как параметр, характеризующий толщину поверхностного, возмущенного слоя, не полностью заполненного материалом, в котором происходит изменение рельефа. Для HSG-Si пленки  $S_z = 123 \text{ nm}$ , что превышает среднюю толщину пленки  $\approx 95 \text{ nm}$ . Для пленок *a*-Si и poly-Si параметр  $S_z$



**Рис. 1.** АСМ-изображения и гистограммы распределения высоты поверхности пленок: *a* — аморфного кремния, *b* — HSG-Si и *c* — поликристаллического „гладкого“ кремния.

Статистические параметры для пленок аморфного, поликристаллического „гладкого“ кремния и HSG-Si

	Аморфный кремний $2.0 \times 2.0 \mu\text{m}$	HSG-Si $2.0 \times 2.0 \mu\text{m}$	„Гладкий“ поликремний $2.0 \times 2.0 \mu\text{m}$
Амплитудные параметры			
Среднеквадратическая шероховатость $S_q$ , nm	$1.15 \pm 0.04$	$18.6 \pm 1.2$	$3.06 \pm 0.08$
Арифметическая шероховатость $S_a$ , nm	$0.91 \pm 0.03$	$15.1 \pm 1.1$	$2.41 \pm 0.07$
Максимальная высота рельефа поверхности $S_z$ , nm	$11.0 \pm 0.92$	$123.0 \pm 4.1$	$28.4 \pm 1.7$
Высота самого высокого пика $S_p$ , nm	$5.48 \pm 1.59$	$36.1 \pm 3.3$	$14.8 \pm 0.8$
Глубина самой глубокой впадины $S_v$ , nm	$5.54 \pm 0.86$	$86.9 \pm 1.9$	$13.6 \pm 2.1$
Асимметрия $S_{sk}$	$0.028 \pm 0.087$	$-0.91 \pm 0.11$	$0.375 \pm 0.035$
Эксцесс $S_{ku}$	$3.25 \pm 0.05$	$3.31 \pm 0.31$	$3.42 \pm 0.08$
Пространственные параметры			
Автокорреляционная длина $S_{al}$ , nm	$17.8 \pm 0.7$	$43.2 \pm 2.1$	$23.7 \pm 1.0$
Аспектное отношение текстуры $S_{tr}$	$0.92 \pm 0.01$	$0.89 \pm 0.03$	$0.92 \pm 0.04$
Скейлинговые, корреляционные параметры			
Коэффициент изрезанности $\alpha$	$0.91 \pm 0.01$	$0.92 \pm 0.01$	$0.92 \pm 0.02$
Латеральная корреляционная длина $\xi$ , nm	$21.2 \pm 0.7$	$51.1 \pm 2.0$	$27.9 \pm 0.5$
Ширина интерфейса $w$ , nm	$1.16 \pm 0.01$	$18.6 \pm 2.8$	$3.11 \pm 0.02$
Длина волны $\lambda$ , nm	—	$221 \pm 10$	—



**Рис. 2.** Корреляционные функции  $H(r)$  для LPCVD пленок аморфного, поликристаллического „гладкого“ кремния и HSG-Si.

равен соответственно 11.0 и 28.4 nm, что составляет 12 и 30% от толщины пленки. Параметры  $S_p$  и  $S_v$  определяются как высота самого высокого пика и глубина самой глубокой впадины, отсчитанные от средней плоскости, определяемой из условия  $\langle Z(x_i, y_k) \rangle = 0$ . Поскольку по определению величина  $S_v$  равна расстоянию от нижней точки поверхности до уровня средней плоскости, то  $S_v$  соответствует средней толщине поверхностного слоя. В случае HSG-Si пленки  $S_v = 86.9$  nm это означает, что средняя толщина поверхностного слоя HSG-Si пленки практически совпадает со средней толщиной пленки. Для пленок  $a$ -Si и poly-Si параметр  $S_v$  равен соответственно 5.54 и 13.6 nm, т.е. средняя толщина поверхностного слоя составляет соответственно 5.8 и 14.3% от средней толщины пленки.

Для характеристики пространственных и корреляционных свойств поверхности используют автокорреляционную функцию  $R(\mathbf{r}) = \langle Z(\mathbf{r}')Z(\mathbf{r}' - \mathbf{r}) \rangle$  [10,13–15] и корреляционную функцию высота-высота  $H(\mathbf{r}) = G(\mathbf{r}) = \langle [Z(\mathbf{r}') - Z(\mathbf{r}' - \mathbf{r})]^2 \rangle$  [9–12], которые получают усреднением по всем парам точек, отстоящим одна от другой на фиксированный вектор сдвига  $\mathbf{r}$ , по выборочной площади  $S$ .

Эти функции 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  $R(\mathbf{r})$  зависит только от модуля  $\mathbf{r}$ :  $R(\mathbf{r}) = R(|\mathbf{r}|) = R(r)$ .

Из автокорреляционной функции  $R(\mathbf{r})$  определяют пространственные параметры поверхности [13,15]: корреляционную длину  $S_{al}$ , соответствующую модулю сдвига  $\mathbf{r}$  в направлении „быстрого“ спада  $R(\mathbf{r})$  до уровня  $R(0)/e$  (или  $0.1 R(0)$ ), аналогично  $S_{sl}$  — корреляционную длину в направлении „медленного“ спада,  $S_{tr}$  — аспектное отношение текстуры, равное отношению  $S_{al}/S_{sl}$ . В случае изотропной поверхности  $S_{tr}$  имеет величину, близкую к единице. Для изученных нами пленок величина  $S_{tr}$  имеет значение  $\sim 0.9$ , и можно сказать, что поверхность пленок *a*-Si, poly-Si и HSG-Si изотропна на масштабе  $L \sim 2 \mu\text{m}$  с погрешностью  $\sim 10\%$ .

Морфология многих пленок хорошо описывается в рамках модели самоаффинного скейлинга [9–12]. В этом случае:  $H(r) \sim r^{2\alpha}$  при  $r \ll \xi$  и  $H(r) \approx 2w^2$  при  $r \gg \xi$ , где  $\alpha$  — коэффициент изрезанности (roughness exponent), называемый также показателем Херста ( $H$ ),  $\xi$  — латеральная корреляционная длина, которая определяет верхнюю границу области самоаффинности и является характеристикой нерегулярности поверхности в латеральном направлении. Флуктуации высоты на малых масштабах ( $< \xi$ ) являются коррелированными и зависимыми, а на больших масштабах ( $> \xi$ ) являются некоррелированными, т.е. случайными, и  $H(r)$  достигает постоянной величины ( $2w^2$ ). Коэффициент  $\alpha$  характеризует степень нерегулярности поверхности на малых масштабах ( $< \xi$ ), он связан с фрактальной размерностью поверхности соотношением  $D_H = 3 - \alpha$ .

На рис. 2 приведены графики корреляционных функций  $H(r)$  для пленок *a*-Si, poly-Si и HSG-Si, построенные в логарифмическом масштабе. Функции  $H(r)$  получали усреднением 5 зависимостей  $H(r) \approx G_S(x)$  [9], соответствующих различным АСМ-изображениям размерами  $2 \times 2 \mu\text{m}$ . Величина коэффициента  $\alpha$ , определенная из наклона начального участка  $H(r)$ , для всех трех типов пленок имеет одинаковое значение  $\approx 0.92$ . Для пленок *a*-Si, poly-Si и HSG-Si найденные значения корреляционной длины  $\xi$  составляют:  $21.2 \pm 0.7 \text{ nm}$ ,  $27.9 \pm 0.5 \text{ nm}$  и  $51.1 \pm 2.0 \text{ nm}$ , а значения  $w$ :  $1.16 \pm 0.01 \text{ nm}$ ,  $3.11 \pm 0.02 \text{ nm}$  и  $18.6 \pm 2.8 \text{ nm}$ .

В отличие от пленок  $a$ -Si и poly-Si, для HSG-Si пленок на зависимости  $H(r)$ , при  $r > \xi$  можно заметить наличие осцилляций. Это лучше видно на графике, построенном в линейном масштабе (вставка на рис. 2). Кроме того, для HSG-Si пленок на функции PSD имеется максимум. Согласно [9–11], такое поведение усредненной функции  $H(r)$  и функции PSD указывает на то, что для описания свойств поверхности HSG-Si пленок следует использовать модель не самоаффинной, а „холмообразной“ (mounded) поверхности. В случае „холмообразной“ поверхности появляется еще один характерный параметр — длина волны  $\lambda$ , которая соответствует среднему расстоянию между „холмами“. Значение параметра  $\lambda$ , найденное из зависимости  $H(r)$ , составляет  $221 \pm 10$  nm, а найденное из функции PSD  $\sim 215 \pm 9$  nm.

Таким образом, для трех типов LPCVD пленок кремния ( $a$ -Si, poly-Si и HSG-Si) получены основные параметры и функции, характеризующие шероховатость, пространственные и корреляционные свойства поверхности. Найдено, что пленки  $a$ -Si, poly-Si и HSG-Si имеют различные гистограммы распределения высот поверхности, поверхность пленок является изотропной на масштабе  $L \sim 2 \mu\text{m}$ , пленки имеют одинаковую величину коэффициента изрезанности (показателя Херста),  $\alpha = 0.92$ , и различные значения латеральной корреляционной длины. Для описания морфологии пленок  $a$ -Si, poly-Si подходит модель самоаффинной поверхности, тогда как для HSG-Si пленок — модель „холмообразной“ поверхности.

## Список литературы

- [1] Kamins T.I. // Polycrystalline Silicon for Integrated Circuits and Displays. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1998.
- [2] Gerritsen E., Emonet N., Caillat C. et al. // Solid State Electron. 2005. V. 49. P. 1767–1775.
- [3] Ino M., Miyano J., Kurogi H. et al. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1996. V. 14. N 2. P. 751–756.
- [4] Watanabe H., Aoto N., Adachi S. et al. // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. N 7. P. 3538–3543.
- [5] Новак А.В., Никольский Ю.В., Фокичев С.Н. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 16. С. 1–8.
- [6] Voutsas A.T., Hatalis K.M. // J. Electrochem. Society. 1993. V. 140. N 1. P. 282–288.



- [7] *Edrei R., Shauly E.N.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2000. V. 18. N 1. P. 41–47.
- [8] *Strauer Y.E., Scorth M., Sweeney J.J.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1997. V. 15. N 3. P. 1007–1013.
- [9] *Yang H.-N., Zhao Y.-P., Chan A.* et al. // Phys. Rev. B. 1997. V. 56. N 7. P. 4224–4232.
- [10] *Zhao Y.-P., Yang H.-N., Wang G.-C.* et al. // Phys. Rev. B. 1998. V. 57. N 3. P. 1922–1934.
- [11] *Pelliccione M., Karabacak T., Gaire C.* et al. // Phys. Rev. B. 2006. V. 74. P. 125 420.
- [12] *Vatel O., Dumas P., Chollet F.* et al. // Jap. J. App. Phys. 1993. V. 32. P. 5671–5674.
- [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.
- [14] ISO 25178-2:2012 Geometrical product specifications (GPS) — surface texture: Areal — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
- [15] ASME B46.1-2009 Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay), American national standard.