

УДК 53.086,621.382

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ И СТРУКТУРЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК КРЕМНИЯ

© 2021 г. А. В. Новак^{a, b, *}, В. Р. Новак^c, Д. И. Смирнов^{a, d}, А. В. Румянцев^a

^aНациональный исследовательский университет “МИЭТ”, Зеленоград, 124498 Россия

^bАО “Ангстрем”, Зеленоград, 124460 Россия

^cООО “НТ-МДТ Спектрум Инструментс”, Зеленоград, 124460 Россия

^dООО “ИМАШ ресурс”, Москва, 105082 Россия

*e-mail: novak-andrei@mail.ru

Поступила в редакцию 12.01.2020 г.

После доработки 18.03.2020 г.

Принята к публикации 22.03.2020 г.

Изучена морфология поверхности и структура тонких LPCVD-пленок кремния толщиной менее 40 нм, получаемых при температуре осаждения $T = 550^\circ\text{C}$, при которой обычно получают аморфные пленки (a-Si), и при температуре осаждения 584°C , при которой получают пленки поликристаллического кремния с полусферическими зёрнами (HSG-Si) с большой шероховатостью поверхности. Найдено, что при температуре осаждения 550°C при толщинах 35 нм и более происходит образование аморфных пленок, имеющих сравнительно гладкую поверхность, а при толщинах менее 35 нм происходит образование зернообразных поликристаллических HSG-Si-пленок с большой шероховатостью поверхности. Показано, что зернообразные пленки кремния, осажденные при $T = 550^\circ\text{C}$ ($d = 28$ нм), имеют морфологию, аналогичную HSG-Si-пленкам, осажденным при $T = 584^\circ\text{C}$ ($d = 29$ нм). Найдено, что с уменьшением толщины осаждаемой пленки кремния до 28 нм нижняя граница температурного интервала, при которой происходит образование HSG-Si пленок, сдвигается в сторону меньших температур до $T = 550^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, пленки аморфного кремния, пленки поликристаллического кремния с полусферическими зёрнами (HSG-Si), шероховатость поверхности.

DOI: 10.31857/S1028096021020114

ВВЕДЕНИЕ

Тонкие пленки аморфного кремния (a-Si), поликристаллического (poly-Si) и поликристаллического кремния с полусферическими зёрнами (HSG-Si), получаемые на основе метода химического осаждения из газовой фазы (CVD), широко используются в микроэлектронике, в том числе в различных трехмерных полупроводниковых структурах, например, для вертикальных транзисторов (V-NAND flash-память) [1, 2], шелевых конденсаторов для DRAM-памяти [3, 4]. В частности, особый интерес представляют тонкие слои аморфного кремния, на основе которых в последнее время разрабатываются различные тонкопленочные транзисторы (TFT) [2, 5–8] с тонкопленочным каналом из поликристаллического кремния (poly-Si), получаемым при кристаллизации аморфного кремния (a-Si). В данных работах при изготовлении тонкопленочных транзисторов и трехмерных устройств канал poly-Si формировали посредством кристаллизации тонких LPCVD-пленок a-Si с толщинами 50–100 нм. Использо-

вание тонких слоев a-Si обусловлено тем, что слои poly-Si, полученные кристаллизацией a-Si, имеют существенно меньшую шероховатость поверхности [9, 10].

Шероховатость поверхности, неоднородность толщины и структура осажденных слоев кремния оказывает существенное влияние на электрофизические характеристики приборов (особенно с уменьшением толщины слоев), что обусловлено необходимостью миниатюризации тонкопленочных устройств. Ранее изучению морфологии и структуры пленок кремния было посвящено значительное количество работ, однако в основном изучались довольно “толстые” пленки, имеющие толщины более 50–500 нм.

В данной работе изучается морфология и структура тонких пленок кремния, имеющих среднюю толщину d менее 50 нм, полученных методом химического парофазного осаждения при низком давлении (LPCVD) и при температурах осаждения $T_d \approx 550$ и $\approx 584^\circ\text{C}$.

ЭКСПЕРИМЕНТ И АНАЛИЗ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

Методика изготовления и измерения пленок

Пленки кремния получали методом химического парофазного осаждения при низком давлении (LPCVD) при разложении моносилана SiH_4 , давление составляло 0.2 Торр. В качестве подложек для осаждения использовались пластины монокристаллического кремния p -типа (с-Si) со слоем термического окисла (SiO_2) толщиной 35 нм. Изготавливались и исследовались два типа образцов: пленки, осаждаемые при температуре 550°C , и пленки, осаждаемые при 584°C . Согласно литературным данным [7–12], температура осаждения около 550°C – это температура, при которой обычно производят получение пленок аморфного кремния (a-Si). Температура осаждения, равная 580 – 584°C , соответствует температуре, при которой получают пленки поликристаллического кремния с полусферическими зернами (HSG-Si – Hemispherical Grain Si), имеющие большую площадь поверхности [13–15]. Толщина получаемых слоев кремния варьировалась от 10 до 60 нм.

Изучение морфологии производили методами атомно-силовой (АСМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ). Для АСМ-измерений использовался атомно-силовой микроскоп Солвер Р47 (NT-MDT, г. Зеленоград) в полуконтактном режиме сканирования, амплитуда колебаний зонда составляла 5–10 нм. В качестве зондов использовали кантилеверы марки NSG_01 (NT-MDT), имеющие, согласно паспортным данным, радиус кривизны острия менее 5–10 нм. В результате АСМ-измерений получали сканы АСМ-изображений размерами 500×500 нм, 1×1 мкм, имеющие 1024×1024 точек. Для полученных АСМ-изображений, представляющих двумерные функции высоты поверхности $Z(x_i, y_j)$, отсчитанной от базовой плоскости XY , вычисляли основные параметры поверхности, определяемые стандартами ISO 25178-2:2012 [16] и ASME B46.1-2009 [17] и характеризующие шероховатость, пространственные и корреляционные свойства поверхности. Расчет параметров морфологии и математическую обработку АСМ-изображений проводили при помощи программных пакетов Image Analysis P9 (NT-MDT). РЭМ-изображения получали на электронно-ионном микроскопе Helios Nanolab 650. Структуру пленок кремния изучали при помощи многофункционального рентгеновского дифрактометра Smartlab 3 kW (Rigaku, Япония) и просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Titan Themis 200 при ускоряющем напряжении 200 кВ. Рентгеноусторные измерения были проведены в скользящей несимметричной геометрии сканирования для исследования нанометрового приповерхностного слоя за счет эф-

фекта полного внешнего рентгеновского отражения. Использована фокусировка Брэгга–Брентано, селекция характеристической линии излучения ($\text{CuK}\alpha$) $\lambda = 0.1542$ нм выполнена при помощи монохроматора-анализатора на базе мозаичного кристалла пиролитического графита. Дифракционный сигнал от исследуемых нанометровых пленок оказался слабым и зашумленным, поэтому выполнена математическая аппроксимация формы пиков стандартной функцией псевдо-Фойгта.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Морфология пленок кремния

На рис. 1 показаны АСМ-изображения пленок кремния, осажденных при $T = 550^\circ\text{C}$ (рис. 1а–1в) и $T = 584^\circ\text{C}$ (рис. 1г–1е) и имеющих средние толщины d , нм: 12 (рис. 1а), 28 (рис. 1б), 35 (рис. 1в), 9 (рис. 1г), 29 (рис. 1д), 40 нм (рис. 1е). В табл. 1 приведены основные статистические параметры, рассчитанные для АСМ-изображений с одинаковой выборочной площадью и усредненные по четырём изображениям.

Как видно из данных (табл. 1 и рис. 1) в исследованном интервале толщин пленок (10–40 нм) при температуре осаждения $T = 584^\circ\text{C}$ происходит образование пленок поликристаллического кремния с полусферическими зернами (HSG-Si) аналогично более толстым пленкам, имеющим толщины 40–150 нм [13–15]. Пленки HSG-Si состоят из сравнительно плотно упакованных зерен (размерами в несколько десятков нанометров) и имеют значительную шероховатость поверхности [16–18]. Площадь поверхности таких пленок примерно в два раза превышает площадь гладкой поверхности.

Традиционным параметром, используемым для характеристики шероховатости поверхности, является среднеквадратичная шероховатость S_q , которая относится к группе амплитудных или высотных параметров [19–21]. Этот параметр также называют шириной интерфейса w [15, 22] и корреляционной длиной в вертикальном направлении [23]. Параметр S_q является характеристикой неоднородности поверхности в вертикальном направлении. Другими высотными параметрами являются S_z , S_v . Параметр S_z (максимальная высота рельефа поверхности) определяется как разность высот между самой высокой и самой низкой точками поверхности на выборочной площади. Этот параметр соответствует толщине поверхностного “возмущенного” слоя, не полностью заполненного материалом, в котором происходит изменение рельефа. Параметр S_v определяется как глубина самой глубокой впадины, отсчитанная от средней плоскости, определяемой из условия $\langle Z(x_i, y_j) \rangle = 0$. Фактически S_v соответ-

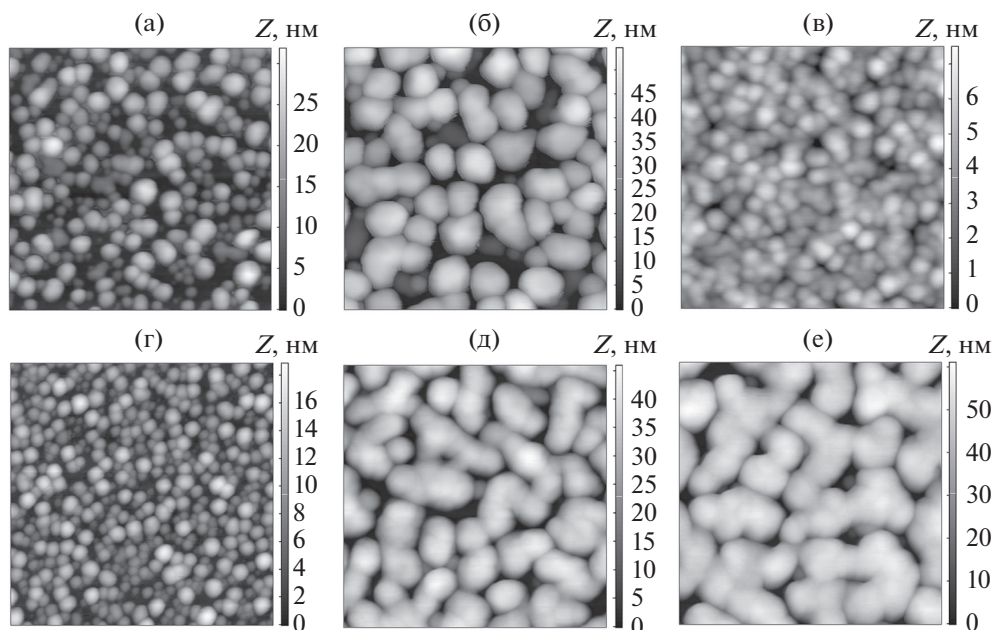


Рис. 1. АСМ-изображения размером 0.5×0.5 мкм пленок кремния, имеющие средние толщины d и температуры осаждения T , соответственно: 12 нм, $T=550^\circ\text{C}$ (а); 28 нм, $T=550^\circ\text{C}$ (б); 35 нм, $T=550^\circ\text{C}$ (в); 9 нм, $T=584^\circ\text{C}$ (г); 29 нм, $T=584^\circ\text{C}$ (д); 40 нм, $T=584^\circ\text{C}$ (е).

ствует средней толщине поверхностного “возмущенного” слоя.

В случае исследованных нами пленок HSG-Si, осажденных при температуре 584°C , среднеквадратичная шероховатость S_q возрастает с 3.7 до 11.8 нм при увеличении средней толщины d от 10 до 40 нм. При этом соответственно максимальная высота рельефа поверхности S_z возрастает от 20.6 до 63.1 нм, средний размер зерен D_g увеличивается от 22 до 70 нм, средняя высота зерен Z_g увеличивается с 12 до 52 нм. Автокорреляционная длина S_{al} , характеризующая неоднородность поверхности в латеральном направлении, возрастает с 10 до 22 нм.

В случае пленок кремния, осажденных при температуре $T=550^\circ\text{C}$, при средней толщине пленки d менее 35 нм происходит образование зернообразных пленок, имеющих большую шероховатость поверхности, которые по своей морфологии аналогичны HSG-Si-пленкам, получаемым при температуре осаждения $T=584^\circ\text{C}$. А затем с ростом средней толщины, происходит резкое изменение морфологии пленки. И при толщине $d=35$ нм и более происходит образование аморфных пленок кремния. Соответственно, для пленок, осажденных при $T=550^\circ\text{C}$, при средних толщинах 12 и 28 нм среднеквадратичная шероховатость S_q составляет 6.1 и 13.0 нм; максимальная высота рельефа S_z – 34 и 55 нм; средний размер зерен D_g – 27 и 52 нм; средняя высота зерен

Z_g – 17 и 39 нм; автокорреляционная длина в латеральном направлении S_{al} – 16 и 22 нм.

Некоторое отличие морфологии HSG-Si-пленок, осажденных при $T=550^\circ\text{C}$ от пленок, осажденных при $T=584^\circ\text{C}$, состоит в том, что в пленках ($T=550^\circ\text{C}$) зерна являются более каплеобразными и более изолированными друг от друга, что хорошо видно на РЭМ-изображениях (рис. 2), где показан фрагмент пленки толщиной $d=28$ нм ($T=550^\circ\text{C}$) и пленки $d=29$ нм ($T=584^\circ\text{C}$).

Рентгенофазовый анализ пленок кремния

На рис. 3 представлены рентгеновские дифрактограммы для двух пленок кремния: зернообразной (толщина $d=28$ нм, $T=550^\circ\text{C}$) и HSG-Si-пленки ($d=29$ нм, $T=584^\circ\text{C}$). На дифрактограмме пленки с полусферическими зернами (HSG-Si) отчетливо видны дифракционные отражения от различных кристаллографических плоскостей кремния, что указывает на поликристаллический характер исследуемого образца. В то же время дифракционный сигнал от пленки кремния толщиной $d=28$ нм ($T=550^\circ\text{C}$), имеющей зернообразную морфологию, определяются слабо, что характерно для образцов, в которых процесс кристаллизации не завершен полностью.

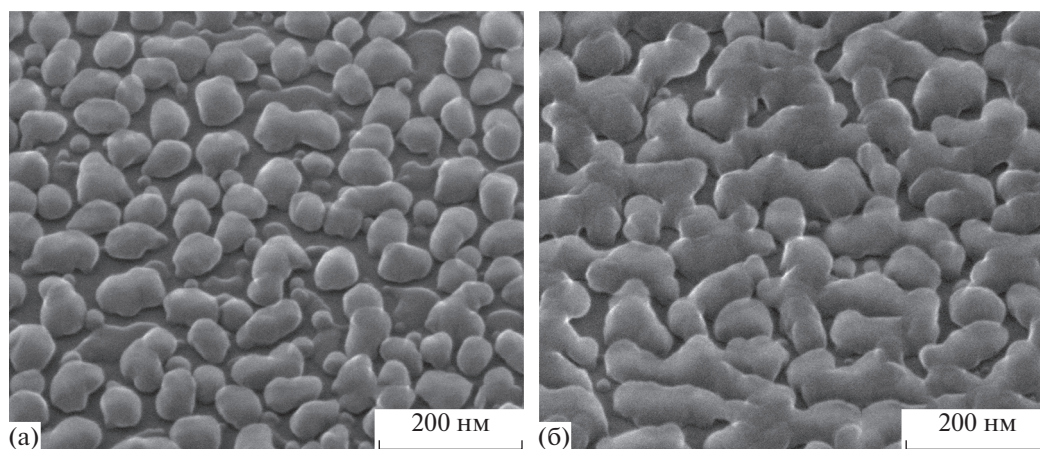
Наблюдение наибольшей интенсивности пика Si(311) по сравнению с Si(111) в образцах согласуется с данными, опубликованными в работах [17,

Таблица 1. Основные статистические параметры, рассчитанные для АСМ-изображений пленок кремния, осажденных при температурах 550 и 584 °С

Температура осаждения T , °С	550°С			584°С		
Средняя толщина пленки d , нм	12	28	35	9	29	40
Размер зерен D_g , нм	27.4 ± 1.1	51.7 ± 1.1	—	22.2 ± 1.1	64.1 ± 1.2	70.3 ± 3.7
Высота зерен Z_g , нм	17.1 ± 1.0	39.0 ± 1.0	—	11.6 ± 1.2	41.1 ± 0.83	51.8 ± 1.3
Отношение Z_g/D_g	0.62	0.75	—	0.52	0.64	0.74
Плотность зерен N_g , 1/(мкм · мкм)	864	262	—	1500	200	160
<i>Амплитудные параметры</i>						
Максимальная высота рельефа поверхности S_z , нм	33.8 ± 2.5	55.3 ± 3.4	9.36 ± 0.9	20.6 ± 1.9	52.4 ± 0.7	63.1 ± 1.7
Среднеквадратичная шероховатость S_q , нм	6.05 ± 0.3	13.0 ± 0.8	1.19 ± 0.1	3.7 ± 0.1	10.7 ± 0.1	11.8 ± 0.4
Глубина самой глубокой впадины S_v , нм	12.4 ± 1.2	28.2 ± 2.1	5.4 ± 0.4	8.5 ± 1.2	29.6 ± 0.8	40.6 ± 0.8
Высота самого высокого пика S_p , нм	21.3 ± 1.1	27.1 ± 1.2	3.93 ± 0.2	12.0 ± 1.2	22.8 ± 0.5	22.9 ± 1.0
Асимметрия S_{sk}	0.35 ± 0.05	-0.45 ± 0.05	-0.28 ± 0.12	0.19 ± 0.13	-0.89 ± 0.01	-1.29 ± 0.06
Экссесс S_{ku}	2.47 ± 0.10	2.16 ± 0.10	3.16 ± 0.13	2.49 ± 0.16	3.12 ± 0.03	4.43 ± 0.15
<i>Пространственные параметры</i>						
Автокорреляционная длина S_{al} , нм	16.1 ± 1.1	22.0 ± 1.6	13.5 ± 0.9	10.0 ± 0.4	20.1 ± 0.4	22.3 ± 1.0
Аспектное отношение текстуры S_r	0.9 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.9 ± 0.1

18], где сообщалось, что зерна, из которых образованы HSG-Si-пленки, ориентированы преимущественно в плоскости (001) и образуют текстуру. В указанных работах и в настоящем исследовании рентгеноструктурные измерения проведены в скользящей несимметричной геометрии, в связи с чем, для текстуры (001) преобладающим будет отражение от плоскости (311).

Для HSG-Si-пленки по уширению дифракционного пика Si(111) по формуле Селякова-Шеррера (с поправкой на геометрическое расхождение пучка в скользящей геометрии сканирования) рассчитана величина области когерентного рассеяния (ОКР), связанная со средними размерами блоков в кристаллитах пленки. Величина ОКР находится в пределах 10–15 нм, что удовле-

**Рис. 2.** РЭМ-изображения пленок кремния: а – $d = 28$ нм, $T = 550^\circ\text{C}$; б – $d = 29$ нм, $T = 584^\circ\text{C}$.

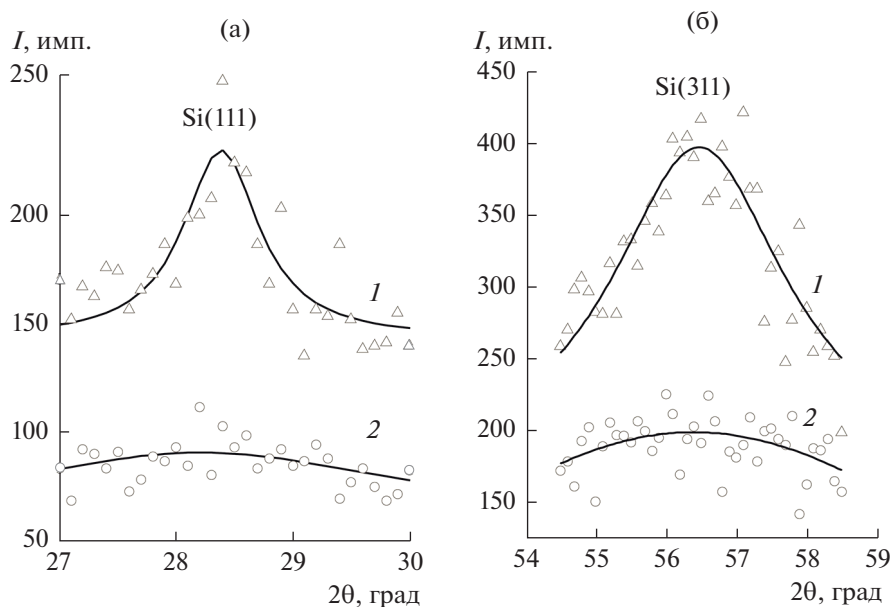


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы исследуемых пленок: а – дифракционные отражения от кристаллографической плоскости Si(111), б – Si(311). Кривая 1 – сигнал от HSG-Si-пленки толщиной $d = 29$ нм, $T = 584^\circ\text{C}$; кривая 2 – от зернообразной кремниевой пленки толщиной $d = 28$ нм, $T = 550^\circ\text{C}$.

творительно согласуется с общей толщиной HSG-Si-пленки $d = 29$ нм.

Ранее в работах [13–15] проводилось изучение условий формирования HSG-Si-пленок кремния для интервала толщин 60–170 нм. Было найдено, что температурный интервал, в котором возможно образование HSG-Si-пленок, с уменьшением толщины осажденной пленки расширяется, и при этом нижняя граница температурного интервала смещается в сторону меньших температур. Так, эта граница температурного интервала соответствует: 580°C при толщине 150 нм; 578°C при толщине 100 нм и 570°C при толщине 60 нм [13]. Из полученных нами данных следует, что с уменьшением толщины осаждаемой пленки до 28 нм нижняя граница температурного интервала, при которой происходит образование HSG-Si-пленки, сдвигается до $T = 550^\circ\text{C}$.

Морфология и структура пленок кремния, осажденных при $T = 550^\circ\text{C}$ и имеющих толщину более 30–35 нм, существенно отличается от более тонких HSG-Si-пленок, полученных при этой же температуре. Такие пленки являются аморфными и имеют сравнительно гладкую поверхность по сравнению с пленками поликристаллического кремния и пленками HSG-Si [10]. Так, в случае пленки толщиной $d = 35$ нм ($T = 550^\circ\text{C}$) (рис. 1в): среднеквадратичная шероховатость S_q составляет 1.2 нм, максимальная высота рельефа $S_z = 9.4$ нм. В частности, такой параметр, как относительное увеличение площади поверхности S_{dr} [16–18], в случае пленки $d = 35$ нм ($T = 550^\circ\text{C}$) составляет

около 1.2%, в то время как в случае пленок HSG-Si значение параметра S_{dr} составляет ~80–100%.

На рис. 4 показаны ПЭМ-изображения образцов поперечного сечения пленки кремния $d = 35$ нм, $T = 550^\circ\text{C}$, осажденной на слой оксида кремния, толщиной 35 нм, который сформирован на кремниевой пластине. В верхней части рисунка виден защитный слой платины и аморфного углерода (Pt + a-C), необходимый для минимизации повреждений изучаемого материала в процессе приготовления тонкой фольги методом фокусированного ионного пучка.

Из ПЭМ-данных, показанных на рис. 4, видно, что пленка толщиной $d = 35$ нм ($T = 550^\circ\text{C}$) является сплошной, внутри ее отсутствуют какие-либо зерна, а поверхность ее достаточно гладкая. Согласно данным, полученным нами ранее [10], пленки кремния, осажденные при $T = 550^\circ\text{C}$ и имеющие толщины в интервале 40–500 нм, являются аморфными, причем с ростом толщины шероховатость поверхности таких пленок уменьшается.

Тот факт, что LPCVD-пленка, осажденная при $T = 550^\circ\text{C}$ и имеющая толщину 35 нм, не содержит внутри себя каких-либо зерен, указывает на то, что нижний слой пленки, образованный в начале осаждения, не содержит зерен. Из этого следует, что ранее сделанное предположение [10, 24] об эволюции морфологии поверхности тонких LPCVD-пленок аморфного кремния в процессе роста не вполне соответствуют действительности.

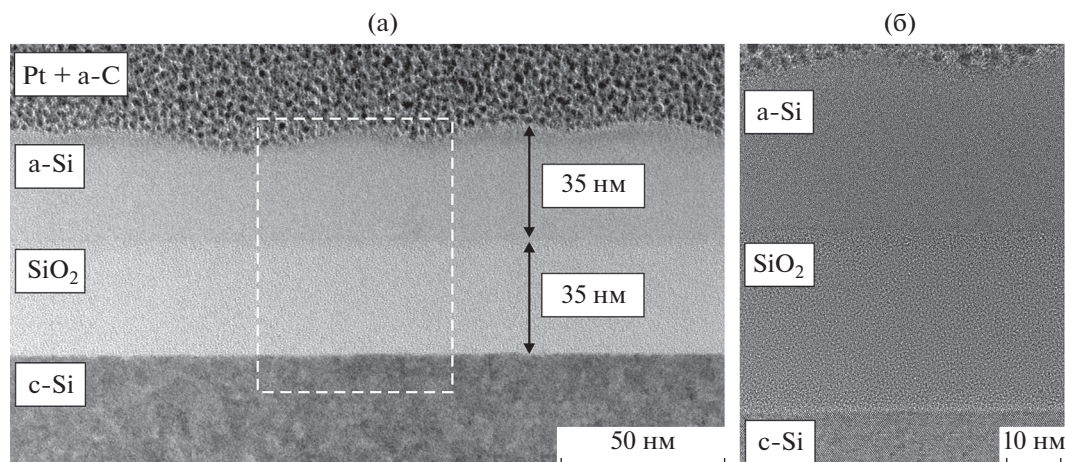


Рис. 4. ПЭМ-изображение пленки кремния толщиной 35 нм, осажденной при $T = 550^\circ\text{C}$ на слой оксида кремния толщиной 35 нм (а). Увеличенное изображение области, выделенной на рис. 4а штриховой линией (б).

Согласно этим представлениям [10, 24], при LPCVD-осаждении пленки аморфного кремния сначала происходит образование зернообразного слоя, имеющего значительную шероховатость, а затем с ростом толщины этот слой зарастает аморфным кремнием, при этом шероховатость уменьшается. Обнаруженное нами отсутствие зерен в нижнем слое аморфной LPCVD-пленки, осажденной при $T = 550^\circ\text{C}$ и имеющей толщину 35 нм показывает, что это не так. Т.е. на начальной стадии осаждения пленки не происходит образования кристаллических полусферических зерен и последующее их зарастание кремнием, имеющим аморфную фазу. Это, в частности, согласуется с представлениями по образованию и росту HSG-Si-пленок [16–18]. Согласно этим представлениям, центры зарождения полусферических зерен возникают на поверхности аморфного кремния, и во время осаждения верхняя поверхность осаждающейся пленки еще имеет аморфную структуру. Затем образуется структура HSG-Si путем зарождения и роста зерен через миграцию атомов Si на чистой поверхности осажденного аморфного Si как во время продолжающегося осаждения, так и последующего отжига в вакууме (или нахождения пленки в течение некоторого времени при температуре осаждения в бескислородной атмосфере).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведено исследование морфологии поверхности и структуры тонких LPCVD-пленок кремния (в интервале толщин 10–40 нм), получаемых при температуре осаждения $T = 550^\circ\text{C}$, которая обычно используется для получения слоев аморфного кремния (при толщинах 50–500 нм), и при температуре 584°C , при

которой получают HSG-Si-пленки с большой шероховатостью поверхности.

Для тонких LPCVD-пленок кремния (в интервале толщин 10–40 нм), получаемых при температурах осаждения 550 и 584°C , из анализа АСМ-данных получены такие характеристики поверхности как средний размер D_g , средняя высота Z_g и плотность зерен N_g , среднеквадратичная шероховатость поверхности S_q , максимальная высота рельефа S_z , латеральная корреляционная длина S_{al} и другие статистические параметры.

Показано, что при получении пленок кремния при температуре осаждения $T = 550^\circ\text{C}$, наблюдается зависимость от средней толщины осажденного слоя: при толщине 35 нм и более происходит образование аморфных пленок, имеющих сравнительно гладкую поверхность, а при толщинах менее 35 нм происходит образование поликристаллических пленок кремния с полусферическими зернами HSG-Si с большой шероховатостью поверхности.

Найдено, по данным рентгенофазового анализа, что в зернообразных пленках кремния, осажденных при $T = 550^\circ\text{C}$ и имеющих толщину $d = 28$ нм, не завершено полностью процесс кристаллизации. Пленки HSG-Si толщиной $d = 29$ нм, осажденные при $T = 584^\circ\text{C}$, состоят из наноразмерных кристаллитов кремния, которые образуют текстуру с преимущественной ориентацией в плоскости (001).

Получено, что с уменьшением толщины осаждаемой LPCVD-пленки кремния до 28 нм нижняя граница температурного интервала, при которой происходит образование HSG-Si-пленки, сдвигается в сторону меньших температур до $T = 550^\circ\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang B., Gao B., Wu H., Qian H. // *Microelectronic Engineering*. 2018. V. 192. P. 66.
2. Nguyen M.C., Jeon Y.S., Tong D.T., You S.W., Jeong J.K., Kim B., Ahn J.Y., Hwang K., Choi R. // *Solid-State Electronics*. 2015. V. 104. P. 86.
3. Yang H.J., Hee S.K., Seong J.K. // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2002. V. 5. P. 497.
4. Chao T.S., Ku W.M., Lin H.C., Landheer D., Wang Y.Y., Mori Y. // *IEEE Transactions on electron devices*. 2004. V. 51. № 12. P. 2200.
5. Wang L., Sun L., Han D., Wang Y., Chan M., Zhang S. // *J. Display Technol.* 2014. V. 10. № 4. P. 317.
6. Kuo P.Y., Chao T.S., Lai J.T., Lei T.F. // *IEEE Electron Device Lett.* 2009. V. 30. № 3. P. 237.
7. Wu C.Y., Liu Y.T., Liao T.C., Yu M. H., Cheng H.C. // *IEEE Electron Device Lett.* 2011. V. 32. № 8. P. 1095.
8. Lee I.C., Tsai C.C., Kuo H.H., Yang P.Y., Wang C.L., Cheng H.C. // *IEEE Electron Device Lett.* 2012. V. 33. № 4. P. 558.
9. Harbeke G., Krausbauer L. et al. // *J. Electrochem. Soc.* 1984. V. 131. P. 675.
10. Новак А.В., Новак В.Р., Смирнов Д.И. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 10. С. 18.
11. Edrei R., Shauly E.N., Roizin Y., Hoffman A. // *Appl. Surf. Science*. 2002. V. 188. P. 539.
12. Lai M.Z., Lee P.S., Agarwal A. // *Thin Solid Films*. 2006. V. 504. P. 145.
13. Новак А.В. // Известия вузов. Электроника. 2013. № 6(104). С. 10.
14. Новак А.В., Новак В.Р. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 19. С. 32.
15. Новак А.В., Новак В.Р. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 13. С. 18.
16. Watanabe H., Aoto N., Adachi S., Kikkawa T. // *J. Appl. Phys.* 1992. V. 71. № 7. P. 3538.
17. Ino M., Miyano J., Kurogi H., Tamura H., Nagatomo Y., Yoshimaru M. // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1996. V. 14. № 2. P. 751.
18. Lee E.G., Im H.B. // *J. Materials Science*. 1993. V. 28. P. 6279.
19. ISO 25178-2:2012 Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Areal – Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters.
20. ASME B46.1-2009 Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay), American national standard.
21. 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.
22. Pelliccione M., Lu T.-M. // *Evolution of Thin Film Morphology. Modeling and Simulation*. N.Y.: Springer, 2008.
23. Meakin P. // *Fractals Scaling and Growth Far from Equilibrium*. Camb. Univ. Press, 1998.
24. Nasrullah J., Tyler G.L., Nishi Y. // *IEEE Trans. on Nanotech.* 2005. V. 4. № 3. P. 303.

Features of the Morphology and Structure of Thin Silicon Films

A. V. Novak^{1,2,*}, V. R. Novak³, D. I. Smirnov^{1,4}, A. V. Rumyantsev¹¹National Research University of Electronic Technology, Shokin Square, Bld. 1, Zelenograd, Moscow, 124498 Russia²JSC “Angstrom”, Shokin Square, Proyezd 4806, 4/3, Zelenograd, Moscow, 124460 Russia³LLC “NT-MDT Spectrum Instruments”, Proezd 4922, 4/3, Zelenograd, Moscow, 124460 Russia⁴LLC “IMASH Resource”, Rubtsovskaya nab., 3/1, Moscow, 105082 Russia

*e-mail: novak-andrei@mail.ru

The surface morphology and structure of thin LPCVD silicon films (thicknesses less than 40 nm) obtained at a deposition temperature of $T = 550^\circ\text{C}$, at which amorphous films (a-Si) are usually obtained, and at a deposition temperature of 584°C at which films of polycrystalline silicon with hemispherical grains (HSG-Si) having a large surface roughness are obtained, were studied. It was found that at a deposition temperature of 550°C , at thicknesses of 35 nm and more, amorphous films with a relatively smooth surface are formed, and at thicknesses less than 35 nm, hemispherical grain films with a large surface roughness are formed. It was found that hemispherical grain silicon films deposited at $T = 550^\circ\text{C}$ ($d = 28$ nm) have a morphology similar to HSG-Si films deposited at $T = 584^\circ\text{C}$ ($d = 29$ nm). It was found that with a decrease in the thickness of the deposited silicon film to 28 nm, the lower boundary of the temperature range at which the formation of HSG-Si films occurs shifts toward lower temperatures to $T = 550^\circ\text{C}$.

Keywords: atomic force microscopy, amorphous silicon films, polycrystalline silicon films with hemispherical grains (HSG-Si), surface roughness.