

## Особенности процесса изготовления кремниевых игл для кантилеверов

А.В. Новак<sup>1,2</sup>, В.Р. Новак<sup>3</sup>, А.В. Румянцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>АО «Ангстрем», г. Москва, Россия

<sup>3</sup>ООО «НТ-МДТ Спектрум Инструментс», г. Москва, Россия

Novak@angstrem.ru

Исследование поверхности образцов в атомно-силовой микроскопии проводится с применением кантилеверов, представляющих собой упругую консоль с острой иглой на свободном конце. Качество изображений, получаемых с помощью атомно-силового микроскопа, существенным образом зависит от степени остроты иглы. Широко используемыми являются кантилеверы из монокристаллического кремния, изготавливаемые на основе жидкостного анизотропного травления. В работе изучена зависимость формы и размеров формируемой иглы от концентрации КОН в растворе. Исследовано влияние пирогенного окисления и окисления в атмосфере сухого кислорода на остроту иглы при проведении процесса заострения. Определено, что при 70 %-ной концентрации КОН формируются иглы, имеющие наибольшее аспектное отношение и максимальную высоту. При этом форма иглы представляет собой восьмиугольную пирамиду, боковые грани которой образованы восемью кристаллографическими плоскостями из {311} и {131}. Показано, что при двухэтапном процессе заострения, состоящем из пирогенного окисления и окисления в атмосфере сухого кислорода, удается формировать достаточно острые зонды с радиусом острия 2–5 нм и углом при вершине 14–24°, в то время как одноэтапный процесс заострения игл на основе пирогенного окисления обеспечивает получение зондов с радиусом около 14 нм. Проведены сравнительные испытания изготовленных зондов. С помощью атомно-силового микроскопа получены изображения тестового образца пленки поликристаллического кремния с полусферическими зёрнами (HSG-Si). Определено, что такой статистический параметр, как относительное приращение площади поверхности  $S_{dr}$ , является наиболее чувствительным к «степени остроты» зонда для поверхностей пленки типа HSG-Si.

**Ключевые слова:** анизотропное травление в КОН; атомно-силовая микроскопия; кантилевер

**Для цитирования:** Новак А.В., Новак В.Р., Румянцев А.В. Особенности процесса изготовления кремниевых игл для кантилеверов // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 234–245. DOI: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-234-245>

## Features of the Manufacturing Process of Silicon Tips for Cantilevers

A.V. Novak<sup>1,2</sup>, V.R. Novak<sup>3</sup>, A.V. Rumyantsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research University of Electronic Technology, Moscow,  
Russia

<sup>2</sup>JSC «Angstrem», Moscow, Russia

<sup>3</sup>LLC «NT-MDT Spectrum Instruments», Moscow, Russia

Novak@angstrem.ru

**Abstract:** Sample surface examination in atomic force microscopy is carried out using cantilevers having the form of elastic consoles with sharp needle (tip) at the free end. Quality of images obtained from atomic force microscope (AFM) heavily depends on tip sharpness degree. Silicon cantilevers made based on wet anisotropic etching are widely used in atomic force microscopy. This paper studies the dependence of the shape and size of the resulting tip on the concentration of KOH in the solution, as well as the effect of pyrogenic oxidation and oxidation in a dry oxygen atmosphere on the sharpness of the tip during the sharpening process. It was shown that when 70 % concentration is used, tips with the highest aspect ratio and maximum height are obtained. In this case, the shape of the needle is an octagonal pyramid, the lateral faces of which are formed by eight crystallographic planes from {311} and {131}. It was found that in a two-stage sharpening process, consisting of pyrogenic oxidation and oxidation in a dry oxygen atmosphere, it is possible to form sufficiently sharp probes with a tip radius of 2–5 nm and an apex angle of 14–24°. It has been established that a one-stage sharpening process based on pyrogenic oxidation provides only the production of probes with a radius of about 14 nm. Comparative tests of the manufactured probes in obtaining AFM images of a test sample of a polycrystalline silicon film with hemispherical grains (HSG-Si) were presented. Research study has revealed that such a statistical parameter as the relative increment of the surface area  $S_{dr}$  is the most sensitive to probe sharpness for surfaces of the HSG-Si film type.

**Keywords:** anisotropic etching in KOH; atomic force microscopy; cantilever

**For citation:** Novak A.V., Novak V.R., Rumyantsev A.V. Features of the manufacturing process of silicon tips for cantilevers. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 234–245. DOI: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-234-245>

**Введение.** Поверхность образцов в атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследуется с помощью специальных зондовых датчиков – кантилеверов, представляющих собой упругую консоль с острой иглой на свободном конце. Острая игла – ключевой элемент зонда, поскольку качество получаемых АСМ-изображений существенным образом зависит от степени остроты иглы. В АСМ широко используются кантилеверы из монокристаллического кремния. Для формирования кремниевых игл в основном применяется анизотропное жидкостное травление в растворе KOH [1–5], однако в некоторых случаях [6, 7] предпочтение отдается изотропному жидкостному травлению. В работах [1, 3] для пластин с ориентацией Si (100) изучалась зависимость формы и размеров получаемых игл от формы маски, стороны которой специальным образом ориен-

тировались относительно кристаллографического направления [110], при травлении в растворе КОН. Исследовалась зависимость формы получаемой кремниевой иглы от добавления  $I_2$  и KI в травящий раствор КОН [5]. Кремниевые иглы, полученные посредством анизотропного травления в КОН или ТМАН, недостаточно острые для того, чтобы их можно было использовать для АСМ-кантилеверов. С этой целью проводят процедуру заострения игл [1, 7–11], применяя специальную технологию, разработанную и описанную в работах [8, 9]. Процедура основана на термическом окислении кремниевых игл при температурах ниже 1000 °С и последующем удалении сформированного оксида кремния химическим травлением в HF или буферном травителе. В основе данного процесса – обнаруженный в работе [12] эффект замедления скорости окисления в локальных областях с большой кривизной из-за возникающих механических напряжений на границе  $SiO_2$  и Si, обусловленных увеличением молярного объема при окислении.

Несмотря на значительное количество опубликованных работ, некоторые особенности процесса формирования острых кремниевых игл рассмотрены недостаточно полно. В частности, мало изучено влияние концентрации КОН в растворе на форму, размеры и аспектное отношение получаемой иглы, особенно при высоких концентрациях, а также отсутствует сравнительный анализ влияния на заострение иглы процессов пирогенного окисления и окисления в атмосфере сухого кислорода.

В настоящей работе исследуются особенности формирования острых кремниевых игл, а именно изучается влияние концентрации КОН в растворе на форму, размеры и аспектное отношение получаемой иглы. Проводится сравнительный анализ двух процессов для заострения игл: на основе пирогенного окисления и двухэтапного процесса, на основе пирогенного окисления и окисления в атмосфере сухого кислорода.

**Методика эксперимента.** Для изготовления кремниевых игл и кантилеверов использовались пластины монокристаллического кремния, легированного бором (КДБ-12) с ориентацией (100). Маскирующее покрытие из термического  $SiO_2$  (толщиной 1,3 мкм) формировалось на лицевой стороне пластины. При травлении применялись маски в форме круга диаметром 45 мкм. Травление кремниевых игл проводили в водном растворе КОН. Температура раствора составляла 90 °С для концентрации 30 %, 100 °С для концентрации 50 % и 120 °С для 70 %-ного раствора. Это обусловлено тем, что для данной концентрации при меньшей температуре не происходит полного растворения КОН. Скорости травления в направлении [100] равны соответственно 2,22; 2,18; 0,85 мкм/мин для концентраций 30, 50 и 70 %. Процесс травления проводился до момента удаления маски. Контроль окончания процесса травления осуществлялся в ходе наблюдения за моментом удаления маски с помощью оптического микроскопа (Leitz Ergolux АМС). Для заострения кремниевых игл, полученных в результате травления в КОН, применялись окисление в атмосфере сухого кислорода и пирогенное окисление при температуре 950 °С с последующим удалением оксида кремния в буферном травителе.

Формы и размеры полученных игл исследовали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) (Helios Nanolab 650 FEI). Для тестирования кантилеверов с иглами, подвергнутыми различным заостряющим окислениям, использовался атомно-силовой микроскоп Солвер Р47 (компания NT-MDT) в полуконтактном режиме сканирования. Амплитуда колебаний зонда составляла 5–10 нм. При АСМ-измерениях для оценки «степени остроты» зонда в качестве тестового использовался образец поликристаллического кремния с полусферическими зёрнами (HSG-Si) [13–15].

**Результаты и их обсуждение.** Типичные РЭМ-изображения для кремниевых игл, полученных анизотропным травлением в водном растворе KOH при концентрациях 30, 50 и 70 %, показаны на рис.1.

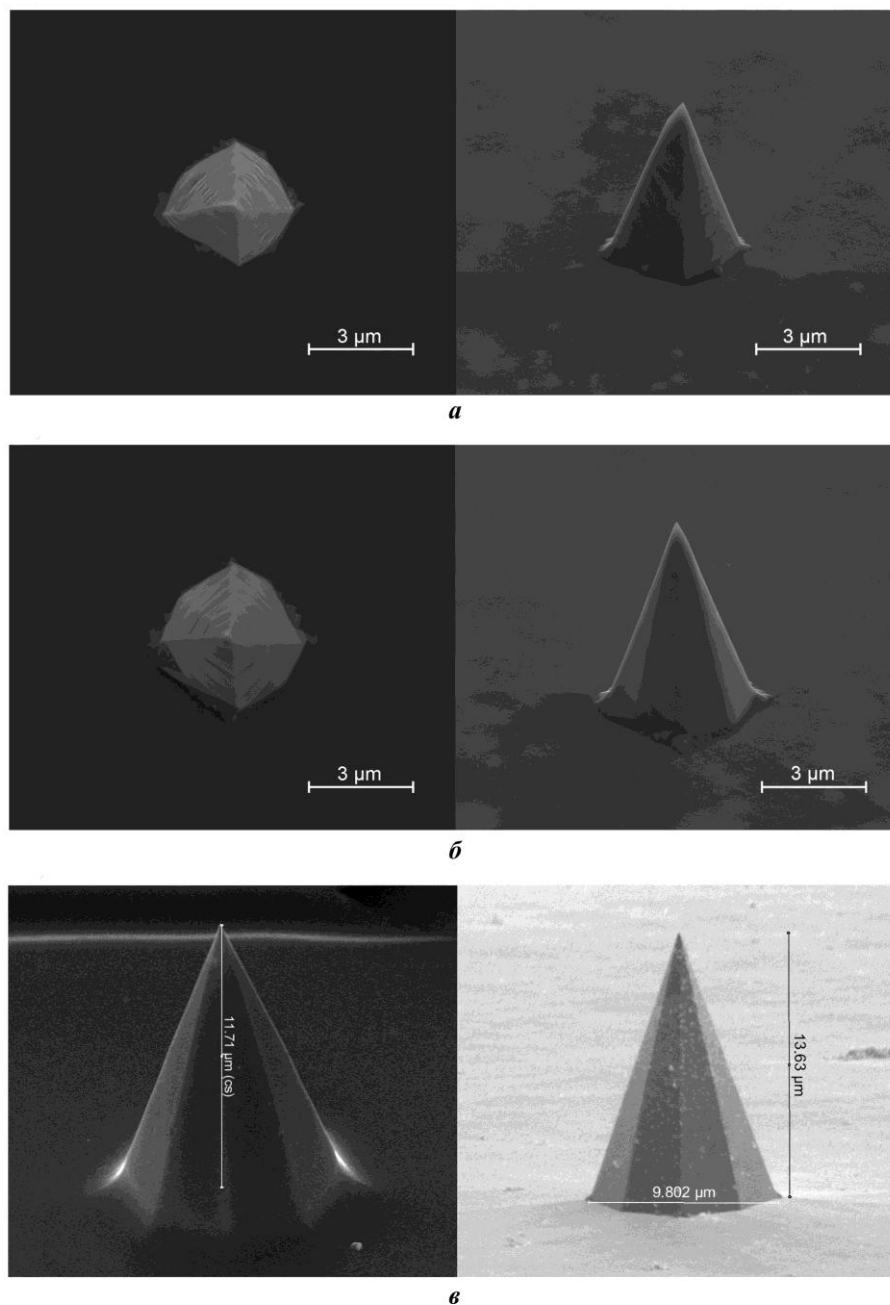


Рис.1. РЭМ-изображения кремниевых игл, полученных анизотропным травлением в водном растворе KOH при концентрациях 30 (а), 50 (б) и 70 % (в)  
Fig.1. SEM-images of silicon tips obtained by anisotropic etching in an aqueous solution of KOH at concentrations 30 (a), 50 (b) and 70 % (c)

Установлено, что иглы, полученные при концентрации раствора КОН 30 % (рис.1,а), имеют форму, более близкую к четырехугольной, – неправильной пирамиды. При концентрации 50 % (см. рис.1,б) иглы уже имеют форму, более близкую к восьмиугольной пирамиде. Время травления, необходимое для формирования иглы, равно 6 мин при концентрации раствора КОН 30 % и примерно 7 мин при концентрации 50 %. Иглы, полученные при концентрации раствора КОН 70 % (рис.1,в), имеют форму восьмиугольной пирамиды. Игла образована восемью гранями, сходящимися в вершине. Для 70 %-ной концентрации требуется значительное время (примерно 20 мин) для формирования игл. Это позволяет лучше контролировать процесс формирования игл и, как следствие, получать иглы с более контролируемыми геометрическими размерами, такими как высота иглы и размер у основания.

Высота игл при концентрации раствора КОН 70 % составляет 11–14 мкм, тогда как для концентраций 30 и 50 % высота игл менее 10 мкм. Для игл, полученных при 70 %-ной концентрации раствора КОН, размер у основания примерно равен 9–10 мкм. Важная характеристика иглы – аспектное отношение, определяемое как отношение высоты иглы к ее латеральному размеру у основания. Для игл, полученных при концентрации раствора 70 и 50 %, аспектное отношение примерно одинаковое и составляет 1,3–1,5, а при концентрации 30 % составляет 1,0–1,1. Максимальная высота иглы, которая может быть получена при 70 %-ной концентрации раствора КОН равна 1/3 от диаметра круглой маски. Для маски диаметром 45 мкм максимальная высота иглы может составлять не более 15 мкм. Использование круглой маски и высокой концентрации раствора КОН приводит преимущественно к формированию именно восьмиугольной пирамиды, сохраняющей свою форму на всей высоте.

Для игл, полученных при 70 %-ной концентрации раствора КОН, проведены расчеты индексов Миллера ( $hkl$ ) плоскостей, образующих иглу. На основе сопоставления формы и геометрических характеристик, полученных из РЭМ-измерений, с расчетной пирамидой, построенной посредством компьютерного моделирования, можно заключить, что форма иглы образована восемью кристаллографическими плоскостями  $(311)$ ,  $(\bar{3}11)$ ,  $(3\bar{1}1)$ ,  $(\bar{3}\bar{1}1)$ ,  $(131)$ ,  $(\bar{1}31)$ ,  $(1\bar{3}1)$ ,  $(\bar{1}\bar{3}1)$ . Основание иглы в виде восьмиугольника образовано линиями, являющимися пересечениями указанных плоскостей с плоскостью  $(001)$ , угол между направлениями  $[310]$  и  $[110]$  равен  $26,57^\circ$ . Полученные результаты согласуются с данными работы [16], в которой различные трехмерные структуры получали посредством травления при разных концентрациях раствора КОН. Так, согласно [16] при молярной концентрации раствора КОН 15 М имели место трехмерные структуры, похожие на основания полученных кремниевых игл при 70 %-ной концентрации раствора КОН.

АСМ-изображение, получаемое при АСМ-измерениях, только с некоторой погрешностью соответствует изображению реальной поверхности из-за искажений, обусловленных конечными размерами острия иглы. Соответственно, чем острее игла кантилевера, тем меньше искажения и тем точнее АСМ-изображение будет соответствовать реальной поверхности исследуемого образца.

Для характеристики степени остроты иглы используют такие параметры, как радиус кривизны острия и угол при вершине острия (или половина угла), а также аспектное отношение острия  $W/L$ , где  $W$  – ширина острия на некотором расстоянии  $L$  от вершины [11, 13]. Широко используемыми для АСМ-измерений являются кантилеверы, имеющие радиус острия менее 10 нм.

Изучено влияние на степень остроты получаемой иглы двух процессов заострения, основанных на термическом окислении. Первый процесс – пирогенное окисление, второй процесс – двухэтапный: пирогенное окисление на первом этапе и сухое окисление (окисление в атмосфере сухого кислорода) на втором. На рис.2 приведены примеры РЭМ-изображений острий, соответствующих трем типам изготовленных игл. Соответственно первый тип – это иглы, полученные путем анизотропного травления в 70 %-ном растворе КОН и не подвергнутые последующей процедуре заострения (см. рис.2,*а*). Второй тип – иглы, полученные путем травления в 70 %-ном растворе КОН и в дополнение подвергнутые заострению на основе пирогенного окисления с последующим удалением оксида (см. рис.2,*б*). Третий тип – иглы, подвергнутые двухэтапному процессу заострения: на первом этапе – пирогенное окисление с последующим удалением оксида, на втором – сухое окисление с последующим удалением оксида (см. рис.2,*в*). Как видно из рисунка, острие иглы, изготовленной только анизотропным травлением в растворе КОН, имеет довольно большой радиус кривизны (около 20–40 нм) и значительный угол при вершине (~ 60°). Иглы, подвергнутые процессу заострения на основе пирогенного окисления, имеют несколько меньший радиус острия (~ 8–14 нм),

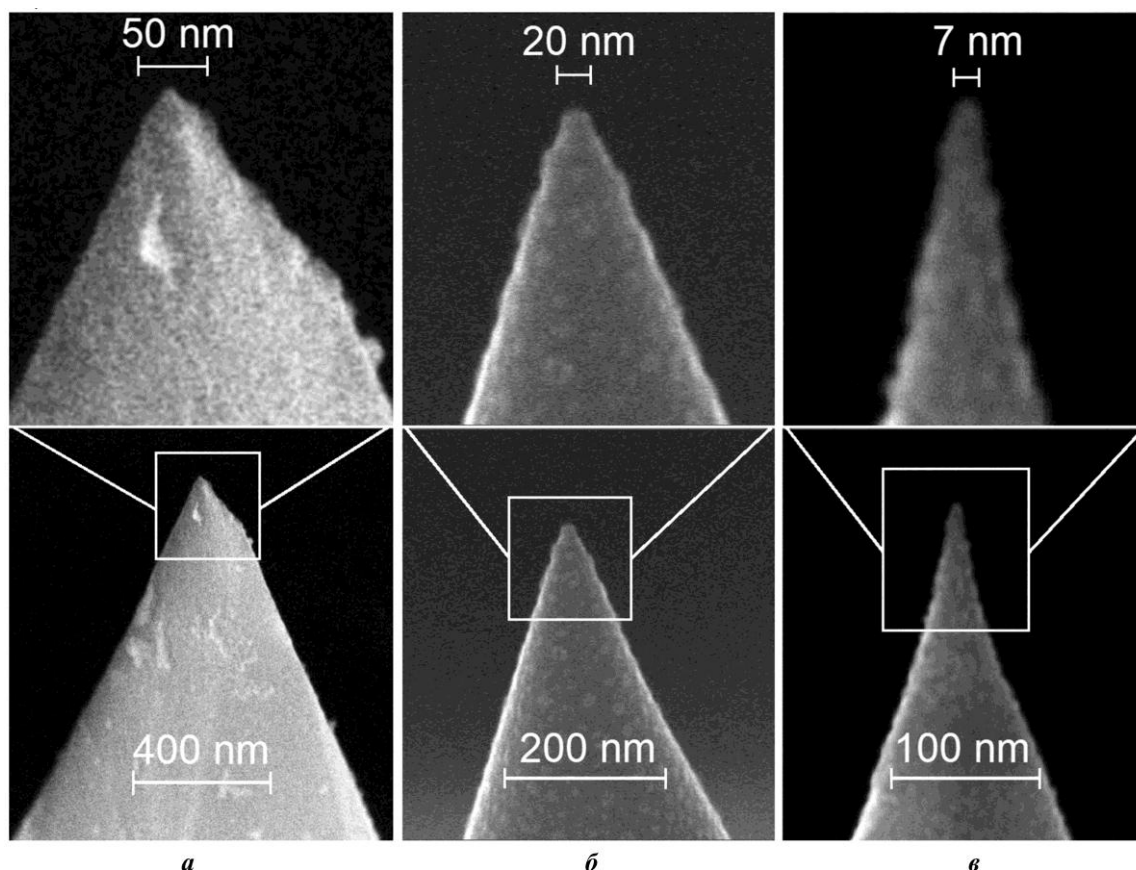
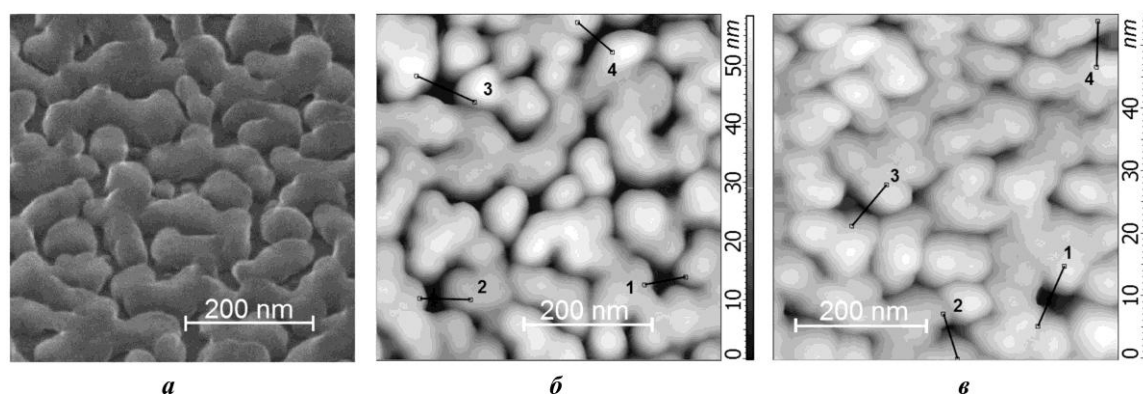


Рис.2. РЭМ-изображения острий игл: *а* – после анизотропного травления и без дополнительных технологических операций; *б* – дополнительно подвергнутых заострению на основе пирогенного окисления при 950 °С; *в* – подвергнутых заострению на основе пирогенного и сухого окисления  
 Fig.2. SEM-images of the tips: *a* – after anisotropic etching and without additional technological operations; *b* – additionally subjected to sharpening based on pyrogenic oxidation at 950 °C; *c* – subjected to a two-stage sharpening process based on pyrogenic and dry oxidation

однако довольно большой угол при вершине ( $\sim 40^\circ\text{--}50^\circ$ ) и, соответственно, значительное аспектное отношение острия ( $W/L \sim 0,9$  при  $L = 100$  нм). Иглы, подвергнутые двухэтапному процессу заострения, наиболее острые. Как следует из РЭМ-измерений, для десяти образцов таких игл значение радиуса острия лежит в интервале 2–5 нм, угол при вершине – в интервале  $14\text{--}24^\circ$ , аспектное отношение острия  $W/L$  – в интервале 0,33–0,56 (при  $L=100$  нм).

Итак, двухэтапная процедура заострения с использованием сухого окисления является более эффективной по сравнению с пироженным окислением. По-видимому, это связано с тем, что в процессе пироженного окисления по сравнению с окислением в атмосфере сухого кислорода при температуре  $950^\circ\text{C}$  рост оксида происходит более интенсивно. В результате сжимающие механические напряжения, препятствующие окислению на самом острие иглы, частично снимаются и происходит лучшее окисление острия. При окислении в атмосфере сухого кислорода при температуре  $950^\circ\text{C}$  рост оксида происходит не так интенсивно, как при пироженном окислении, и эффект замедления роста оксида на острие иглы выражен более сильно по сравнению с пироженным окислением. Таким образом, помимо температуры процесса окисления, на размеры острия иглы влияет среда, в которой происходит процесс окисления кремния. Полученные результаты по заострению игл согласуются с данными работ [8, 9], где отмечено, что острия игл при более интенсивном окислении имеют большие размеры по сравнению с медленным процессом окисления.

Проведено сравнительное тестирование кантилеверов с иглами, заостренными пироженным окислением, и с иглами, заостренными пироженным и сухим окислением. Для тестирования использовался образец пленки поликристаллического кремния с полусферическими зёрнами HSG-Si [13–15]. Он представляет собой слой, состоящий примерно из одинаковых зёрен, расположенных на поверхности плоской подложки. Эффективная толщина HSG-Si-пленки  $\sim 40$  нм, средняя высота зёрен  $\sim 50$  нм, средний латеральный размер  $\sim 70$  нм [15]. Зёрна плотно упакованы в слое, некоторые соседние зёрна в той или иной степени срастаются в латеральном направлении. Однако имеются зёрна, не соприкасающиеся с некоторыми соседями. Расстояние между границами таких зёрен может составлять от нескольких нанометров до 10–30 нм. На рис.3,*а* приведено снятое под углом  $52^\circ$  к нормали РЭМ-изображение участка поверхности тестовой HSG-Si-пленки.



*Рис.3.* РЭМ-изображение HSG-Si-пленки, снятое под углом  $52^\circ$  к нормали (*а*), АСМ-изображения поверхности HSG-Si-пленки, измеренные кантилеверами с радиусом острия 4 (*б*) и 14 нм (*в*)

*Fig.3.* SEM-image of the HSG-Si film, measured at an angle of  $52^\circ$  to the normal (*a*), AFM-images of the HSG-Si film surface, measured by cantilevers with a tip radius 4 (*b*) and 14 nm (*c*)

На рис.3,б,в приведены АСМ-изображения HSG-Si-пленки, измеренные зондами, заостренными соответственно пироженным и сухим окислением (радиус острия 4 нм, угол при вершине  $19^\circ$ ,  $W/L=0,46$  при  $L=100$  нм), пироженным окислением (радиус острия 14 нм, угол при вершине  $40^\circ$ ). РЭМ-измерения этих зондов проводились после выполнения АСМ-измерений. Из приведенных изображений видно, что площадь темных участков, на которых игла проникает до плоской подложки, значительно больше на АСМ-изображении, соответствующем зонду с меньшим радиусом острия (4 нм).

На каждом из АСМ-изображений (см. рис.3,б,в) проведено по четыре линии сечения, профили которых показаны на рис.4. Линии сечений проведены по наиболее низким участкам, содержащим граничные области между зернами. Как видно из рис.4,а (зонд радиусом острия 4 нм), все четыре профиля имеют сравнительно плоские участки с минимальной высотой. Участки профилей соответствуют областям плоской подложки, лежащим между зернами. Длины этих участков 26, 15, 26 и 6 нм соответственно для профилей 1, 2, 3, 4. На основе наиболее крутых участков кривой профиля можно сделать оценку угла острия при вершине, поскольку угол наклона кривой профиля относительно вертикальной оси примерно соответствует половине угла острия при условии, что участок профиля образца вертикальный. Углы наклона наиболее крутых участков составляют  $9^\circ$ ,  $10^\circ$  и  $12^\circ$  соответственно для профилей 2, 4 и 1 (см. рис.4,а). Это дает оценку для угла при вершине около  $18\text{--}24^\circ$ , что согласуется с РЭМ-измерениями. Для зонда радиусом 14 нм (см. рис.4,б) только на одном профиле имеется участок, соответствующий плоской подложке, длиной примерно 17 нм. Наиболее крутые участки профиля имеют значительно большую величину угла наклона ( $16\text{--}24^\circ$ ). Таким образом, зонд с радиусом острия 14 нм намного хуже прописывает рельеф поверхности тестового образца, чем зонд с радиусом острия 4 нм.

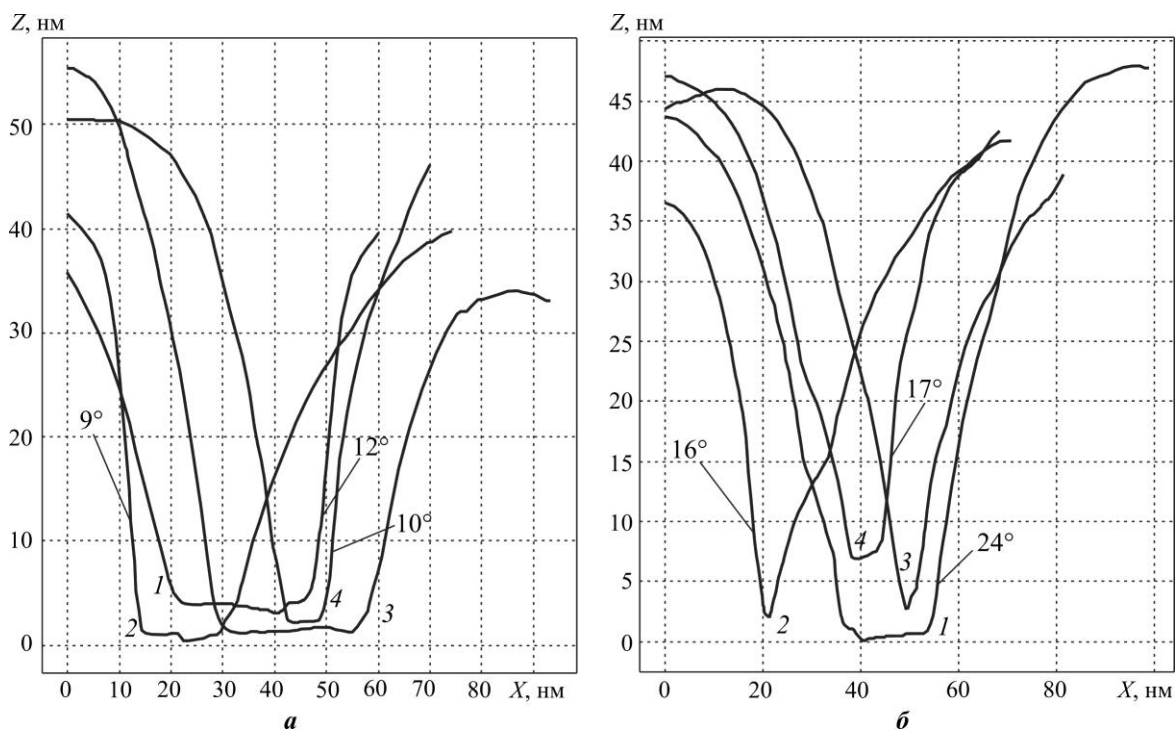


Рис.4. Профили сечений четырех участков для АСМ-изображений, измеренных кантилеверами с радиусом острия 4 (а) и 14 нм (б)

Fig.4. Section profiles of four regions for AFM-images, measured by cantilevers with a tip radius 4 (a) and 14 nm (b)

Для АСМ-изображений, полученных зондами с радиусами острия 14 и 4 нм, рассчитаны основные статистические параметры и функции, используемые для характеристики шероховатости поверхности [13]. При расчетах применялся программный пакет Image Analysis P9 (НТ МДТ). Оценку площади плоских участков для АСМ-изображений можно сделать с помощью функции распределения высот. Определено, что площадь низких точек поверхности, включающих темные (плоские) области на АСМ-изображении, по уровню 0,1 от  $Z_{\max}$  составляет 3,5 % для АСМ-изображения, соответствующего острию радиусом 4 нм, и 0,4 % – острию радиусом 14 нм.

По результатам сравнения основных параметров, характеризующих шероховатость поверхности, установлено, что к остроте зонда наиболее чувствительным оказался параметр  $S_{dr}$  – относительное приращение площади поверхности (определяется как отношение разницы между полной площадью поверхности и площадью плоской поверхности к площади плоской поверхности). Так, для зонда с радиусом острия 4 нм ( $W/L = 0,46$ )  $S_{dr}$  составляет 80 %, тогда как для зонда с радиусом острия 14 нм  $S_{dr} \approx 34$  %. Это хорошо согласуется с данными работы [13], в которой описано влияние размеров зонда на основные статистические параметры поверхности, определяемые из АСМ-изображений HSG-Si-пленки. В частности, при значении аспектного отношении острия  $W/L = 0,46$  (что соответствует зонду с радиусом острия 4 нм)  $S_{dr}$  составляет 78 % для зонда, имеющего параболическую форму. Значение  $S_{dr}$ , равное 80 %, полученное для АСМ-изображения, измеренного зондом с радиусом острия 4 нм, является близким к  $S_{dr}$  реальной поверхности HSG-Si-пленки, составляющей примерно 100 %, что оценивалось альтернативным методом [13, 14].

**Заключение.** В ходе проведенного исследования изучена зависимость формы, размеров и аспектного отношения изготавливаемой иглы от концентрации раствора КОН в интервале 30–70 %. Иглы, изготавливаемые при 70 %-ной концентрации, имеют наибольшую высоту (11–14 мкм при размере исходной маски 45 мкм) и аспектное отношение (1,3–1,5). Форма иглы образована четырьмя кристаллографическими плоскостями из {311} и четырьмя из {131}. Максимальная высота иглы, которая может быть получена при использовании раствора КОН с концентрацией 70 %, составляет 1/3 от диаметра круглой маски.

Иглы, изготовленные только анизотропным травлением в растворе КОН, имеют радиус кривизны 20–40 нм и значительный угол при вершине (~ 60°). Иглы, подвергнутые процессу заострения на основе пирогенного окисления, также имеют значительный радиус острия (~ 8–14 нм), угол при вершине ~ 40–50°. Двухэтапный процесс – пирогенное окисление и сухое окисление – позволяет получить довольно острые иглы, имеющие радиус острия 2–5 нм, угол при вершине 14–24° и аспектное отношение острия  $W/L = 0,33$ –0,56 при ( $L = 100$  нм).

Из статистических параметров, рассчитываемых на основе АСМ-изображений, параметр  $S_{dr}$  наиболее чувствителен к степени остроты зонда для поверхностей пленки типа HSG-Si. Так, для АСМ-изображения, измеренного острием радиусом 4 нм,  $S_{dr}$  составляет 80 %, а для острия радиусом 14 нм –  $S_{dr} = 34$  %. Значение  $S_{dr} = 80$  %, рассчитанное для АСМ-изображения, измеренного острием радиусом 4 нм, близко к  $S_{dr}$  реальной поверхности HSG-Si-пленки, которая составляет ~ 100 %.

Литература

1. **Burt D.P., Dobson P.S., Donaldson L., Weaver J.M.R.** A simple method for high yield fabrication of sharp silicon tips // *Microelectronic Engineering*. 2008. Vol. 85. Iss. 3. P. 625–630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.11.010>
2. **Wolter O., Bayer Th., Greschner J.** Micromachined silicon sensors for scanning force microscopy // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1991. Vol. 9. No. 2. P. 1353–1357. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.585195>
3. **Li J., Xie J., Xue W., Wu D.** Fabrication of cantilever with self-sharpening nano-silicon-tip for AFM applications // *Microsystem Technologies*. 2013. Vol. 19. Iss. 2. P. 285–290. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00542-012-1622-x>
4. **Zhang X., Yu X., Li T., Wang Y.** A novel method to fabricate silicon nanoprobe array with ultra-sharp tip on (111) silicon wafer // *Microsystem Technologies*. 2018. Vol. 24. Iss. 7. P. 2913–2917. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3687-z>
5. **Han J., Lu S., Li Q., Li X., Wang J.** Anisotropic wet etching silicon tips of small opening angle in KOH solution with the additions of I<sub>2</sub>/KI // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2009. Vol. 152. No. 1. P. 75–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.03.008>
6. **Brugger J., Buser R.A., de Rooij N.F.** Silicon cantilevers and tips for scanning force microscopy // *Sensors and Actuators A: Physical*. 1992. Vol. 34. No. 3. P. 193–200. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(92\)85002-J](https://doi.org/10.1016/0924-4247(92)85002-J)
7. **Folch A., Wrighton M.S., Schmidt M.A.** Microfabrication of oxidation-sharpened silicon tips on silicon nitride cantilevers for atomic force microscopy // *Journal of Microelectromechanical Systems*. 1997. Vol. 6. No. 4. P. 303–306. DOI: <https://doi.org/10.1109/84.650126>
8. Formation of silicon tips with <1 nm radius / **R.B. Marcus, T.S. Ravi, T. Gmitter et al.** // *Applied Physics Letters*. 1990. Vol. 56. No. 3. P. 236–238. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.102841>
9. **Ravi T.S., Marcus R.B., Liu D.** Oxidation sharpening of silicon tips // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1991. Vol. 9. No. 6. P. 2733–2737. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.585680>
10. **Dey R.K., Shen J., Cui B.** Oxidation sharpening of silicon tips in the atmospheric environment // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2017. Vol. 35. No. 6. P. 06GC01. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.4998561>
11. **He H., Zhang J., Yang J., Yang F.** Silicon tip sharpening based on thermal oxidation technology // *Microsystem Technologies*. 2017. Vol. 23. No. 6. P. 1799–1803. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00542-016-2941-0>
12. **Marcus R.B., Sheng T.T.** The oxidation of shaped silicon surfaces // *Journal of the Electrochemical Society*. 1982. Vol. 129. No. 6. P. 1278–1282. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2124118>
13. **Новак А.В., Новак В.Р.** Оценка влияния размеров зонда на параметры морфологии поверхности пленок кремния с полусферическими зернами, получаемые методом атомно-силовой микроскопии // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2016. № 9. С. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0207352816090109>
14. **Новак А.В.** Формирование пленок поликристаллического кремния с полусферическими зернами для конденсаторных структур с повышенной емкостью // *Изв. вузов. Электроника*. 2013. № 6 (104). С. 10–16.
15. **Новак А.В., Новак В.Р., Смирнов Д.И., Румянцев А.В.** Особенности морфологии и структуры тонких пленок кремния // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 2. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.31857/S1028096021020114>
16. **Zubel I.** Silicon anisotropic etching in alkaline solutions III: On the possibility of spatial structures forming in the course of Si(100) anisotropic etching in KOH and KOH+IPA solutions // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2000. Vol. 84 (1-2). P. 116–125. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00347-7](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00347-7)

Поступила в редакцию 05.02.2020 г.; после доработки 29.03.2021 г.; принята к публикации 14.04.2021 г.

**Новак Андрей Викторович** – кандидат технических наук, руководитель лаборатории осаждения тонких пленок АО «Ангстрем» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 2/3), старший преподаватель кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), [Novak@angstrom.ru](mailto:Novak@angstrom.ru)

**Новак Виктор Рудольфович** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ООО «НТ-МДТ Спектрум Инструментс» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, пр-д 4922, 4/3), novak@ntmdt.ru

**Румянцев Александр Владимирович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии, доцент кафедры общей физики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), lemi@miee.ru

### References

1. Burt D.P., Dobson P.S., Donaldson L., Weaver J.M.R. A simple method for high yield fabrication of sharp silicon tips. *Microelectronic Engineering*, 2008, vol. 85, iss. 3, pp. 625–630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.11.010>
2. Wolter O., Bayer Th., Greschner J. Micromachined silicon sensors for scanning force microscopy. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1991, vol. 9, no. 2, pp. 1353–1357. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.585195>
3. Li J., Xie J., Xue W., Wu D. Fabrication of cantilever with self-sharpening nano-silicon-tip for AFM applications. *Microsystem Technologies*, 2013, vol. 19, issue 2, pp. 285–290. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00542-012-1622-x>
4. Zhang X., Yu X., Li T., Wang Y. A novel method to fabricate silicon nanoprobe array with ultra-sharp tip on (111) silicon wafer. *Microsystem Technologies*, 2018, vol. 24, issue 7, pp. 2913–2917. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3687-z>
5. Han J., Lu S., Li Q., Li X., Wang J. Anisotropic wet etching silicon tips of small opening angle in KOH solution with the additions of I<sub>2</sub>/KI. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, vol. 152, no. 1, pp. 75–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.03.008>
6. Brugger J., Buser R.A., de Rooij N.F. Silicon cantilevers and tips for scanning force microscopy. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1992, vol. 34, no. 3, pp. 193–200. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(92\)85002-J](https://doi.org/10.1016/0924-4247(92)85002-J)
7. Folch A., Wrighton M.S., Schmidt M.A. Microfabrication of oxidation-sharpened silicon tips on silicon nitride cantilevers for atomic force microscopy. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1997, vol. 6, no. 4, pp. 303–306. DOI: <https://doi.org/10.1109/84.650126>
8. Marcus R.B., Ravi T.S., Gmitter T., Chin K., Liu D., Orvis W.J., Ciarlo D.R., Hunt C.E., Trujillo J. Formation of silicon tips with <1 nm radius. *Applied Physics Letters*, 1990, vol. 56, no. 3, pp. 236–238. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.102841>
9. Ravi T.S., Marcus R.B., Liu D. Oxidation sharpening of silicon tips. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1991, vol. 9, no. 6, pp. 2733–2737. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.585680>
10. Dey R.K., Shen J., Cui B. Oxidation sharpening of silicon tips in the atmospheric environment. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2017, vol. 35, no. 6, pp. 06GC01. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.4998561>
11. He H., Zhang J., Yang J., Yang F. Silicon tip sharpening based on thermal oxidation technology. *Microsystem Technologies*, 2017, vol. 23, no. 6, pp. 1799–1803. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00542-016-2941-0>
12. Marcus R.B., Sheng T.T. The oxidation of shaped silicon surfaces. *Journal of the Electrochemical Society*, 1982, vol. 129, no. 6, pp. 1278–1282. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2124118>
13. Novak A.V., Novak V.R. Influence of the probe sizes on the parameters of the surface morphology of hemispherical-grain polysilicon films: estimation via atomic-force microscopy. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2016, vol. 10, no. 5, pp. 949–958. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1027451016050104>
14. Novak A.V. Formation of polycrystalline-silicon films with hemispherical grains for capacitor structures with increased capacitance. *Semiconductors*, 2014, vol. 48, iss. 13, pp. 1724–1728. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782614130119>
15. Novak A.V., Novak V.R., Smirnov D.I., Romyantsev A.V. Features of the morphology and structure of thin silicon films. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 152–157.

16. ZubeI I. Silicon anisotropic etching in alkaline solutions III: On the possibility of spatial structures forming in the course of Si(100) anisotropic etching in KOH and KOH+IPA solutions. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, vol. 84 (1-2), pp. 116–125. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00347-7](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00347-7)

Received 05.02.2020; Revised 29.03.2021; Accepted 14.04.2021.

**Information about the authors:**

**Andrey V. Novak** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Thin Film Deposition Laboratory, JSC «Angstrom» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 2/3), Senior Lecturer of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), [Novak@angstrom.ru](mailto:Novak@angstrom.ru)

**Victor R. Novak** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, LLC «NT-MDT Spectrum Instruments» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, proezd 4922, 4/3), [novak@ntmdt.ru](mailto:novak@ntmdt.ru)

**Alexander V. Rumyantsev** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher of the Electron Microscopy Laboratory, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), [lemi@miee.ru](mailto:lemi@miee.ru)

## Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал



### RUSSIAN MICROELECTRONICS

Vol. 49, No. 7, 2020. - ISSN PRINT: 1063-7397,

ISSN ONLINE: 1608-3415,

в котором опубликованы избранные статьи  
журнала «Известия высших учебных заведений.  
Электроника».

<http://pleiades.online>

<http://link.springer.com>