

06:10

## Об удалении с поверхности кремния (001) наностроек германия пирамидальной формы после ионно-лучевого осаждения—распыления нанослоя золота

© А.И. Стогний,<sup>1</sup> Н.Н. Новицкий,<sup>2</sup> О.М. Стукалов,<sup>2</sup> А.И. Демченко,<sup>1</sup> В.И. Хитько<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Минский научно-исследовательский институт радиоматериалов,  
Минск, Белоруссия  
e-mail: stognij@ifftp.bas-net.by

<sup>2</sup> Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Белоруссии,  
220072 Минск, Белоруссия  
e-mail: novitski@ifftp.bas-net.by

(Поступило в Редакцию 13 января 2004 г.)

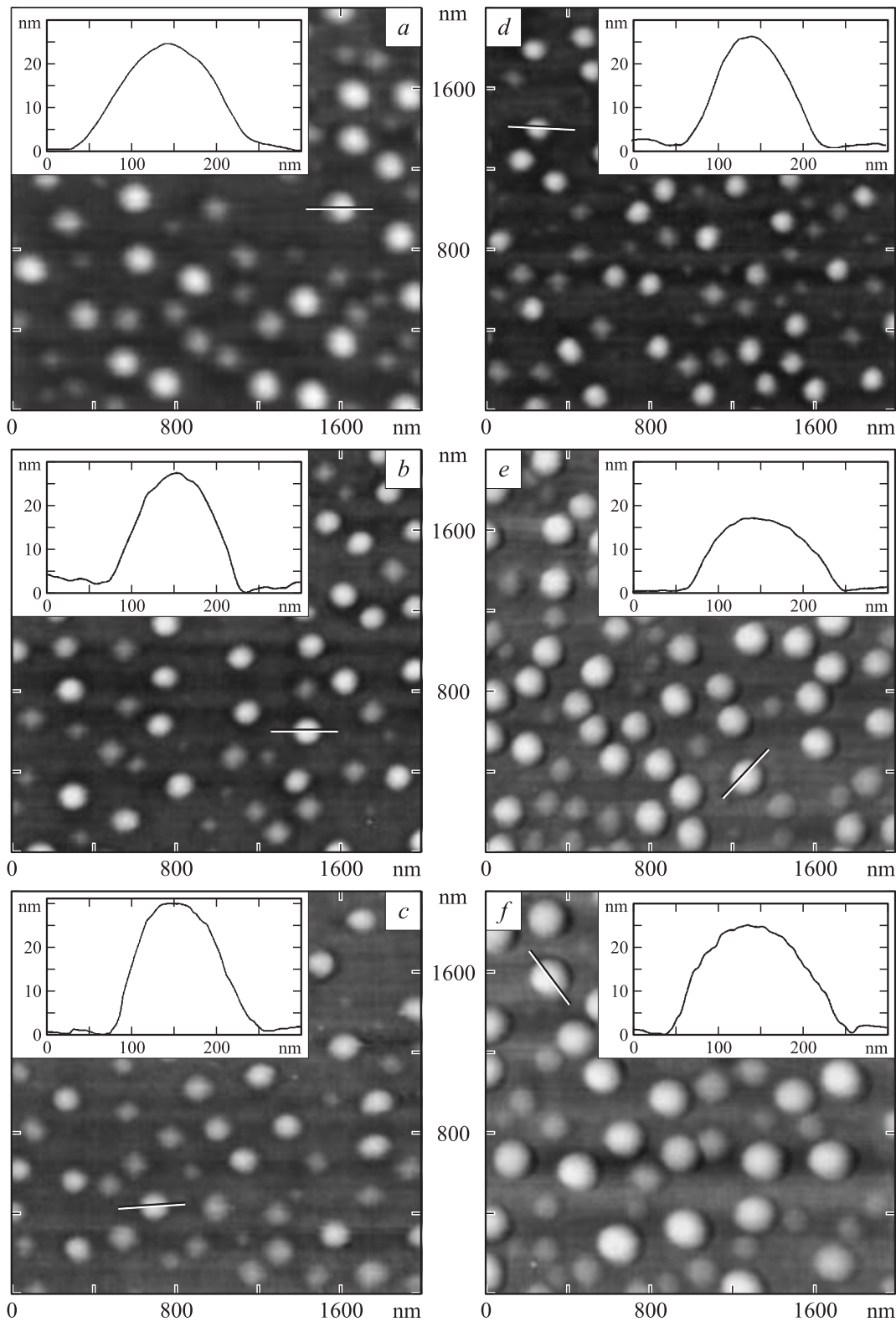
Экспериментально определены режимы селективного удаления наностроек германия пирамидальной формы с поверхности кремния (001) методом последовательного ионно-лучевого осаждения—распыления слоя золота наноразмерной толщины, причем при малом изменении размеров крупных наностроек германия куполообразной формы.

Приборно-ориентированные полупроводниковые гетероструктуры с наностройками германия должны обладать стабильными свойствами, иметь совершенную кристаллическую структуру и быть однородными по размерам [1]. Однако наностройки германия на поверхности кремния (001) имеют вид различающихся по размерам пирамид и более крупных округлых „куполов“ (domes) [2]. Кроме того, наиболее мелкие островки германия могут иметь продолговатый вид и нерегулярные формы (huts) [3]. Многообразие типов наностроек обусловлено влиянием значительного числа контролируемых и неконтролируемых факторов на условия роста гетероструктур и процессы релаксации напряжений. В связи с этим является актуальным применение постростовых методов для получения более однородного распределения наностроек по размерам. Например, воспользовавшись тем фактом, что самые маленькие купола превосходят по размерам наиболее крупные пирамиды [2], можно было бы применить ионное распыление для удаления мелких островков. Но здесь необходимы дополнительные исследования по воздействию ионного облучения на свойства островков, а также следует учитывать, что в результате процессов перепыления по поверхности пластины наностройки германия будут частично запылены частицами примесей, в частности кремния. Поэтому более перспективным представляется использование метода ионно-лучевого осаждения—распыления нанослоя материала, скорость распыления которого сравнима со скоростью распыления нановыступов рельефа исходной поверхности. Данный метод применялся ранее для субнаноразмерного полирования оптических поверхностей [4]. В рассматриваемом случае поверхностных выступов в виде наностроек германия подходящим материалом для сглаживающего нанослоя является золото благодаря химической инертности и близким с германием значениям скоростей распыления ионами аргона [5]. Сущность отмеченного

метода заключается в преимущественном заполнении впадин рельефа поверхности на первом этапе ионно-лучевого осаждения нанослоя золота на исходную поверхность и ионного распыления на втором этапе этого слоя вместе с наностройками германия, характерные размеры которых меньше толщины нанослоя. В связи с тем, что скорость распыления кремния ионами аргона более чем в два раза меньше скоростей распыления германия и золота [5], а слой золота маскирует поверхность кремния от ионного облучения, процессы перепыления кремния по поверхности могут быть экспериментально сведены к минимуму.

Установка двойного ионно-лучевого осаждения—распыления была аналогична описанной в [4]. Рабочим газом служил аргон. Поток золота осаждался нормально к поверхности со скоростью около 7 nm/min. Пучок ионов аргона для распыления имел энергию менее 350 eV и плотность тока 0.06 mA/cm<sup>2</sup>. Скорость распыления золота была менее 1.2 nm/min. Скорости осаждения и распыления золота определяли на плоских участках поверхности кварцевых подложек, как и в [6]. Наностройки германия на пластине кремния (001) Ø100 mm были сформированы методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Подробно методика получения ансамбля наностроек описана в [3]. Пластины любезно предоставил D. Grützmacher. Образцами служили отколотые от пластины соседние участки. Анализ морфологии поверхности проводился при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ) Фемтоскан-001 (Центр перспективных технологий, МГУ, Москва) с полем сканирования до 5 × 5 μm, работающего в контактном режиме с использованием кремниевых кантилеверов CSC12, изготовленных фирмой MicroMasch (www.spmtis.com).

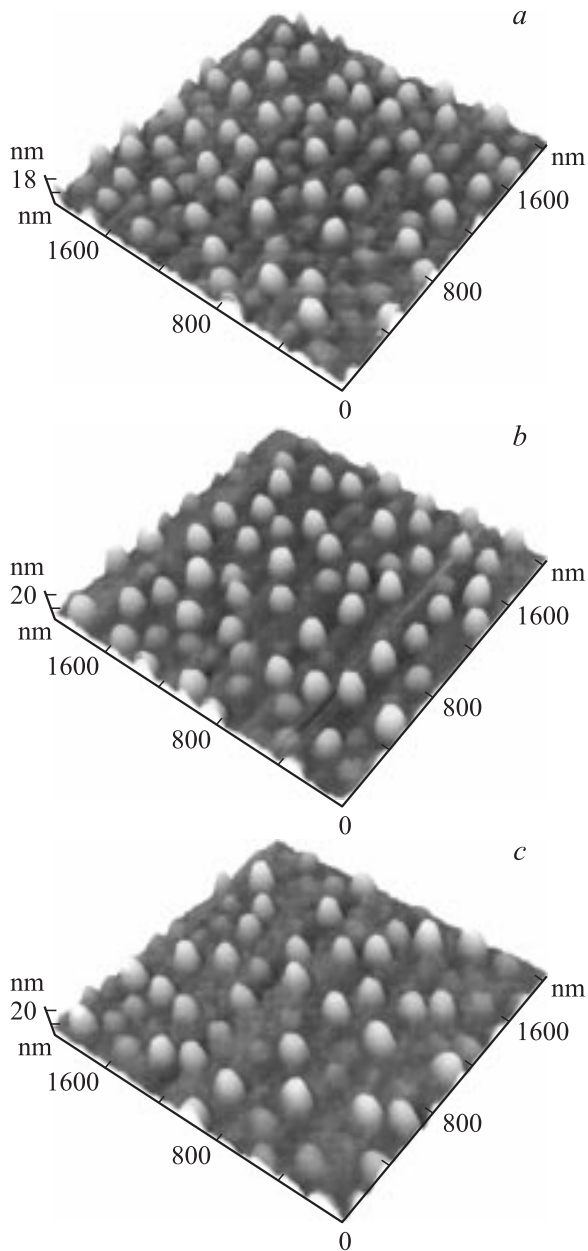
На рис. 1 приведены АСМ изображения исходной поверхности (a), поверхностей после осаждения слоя золота в течение 5 (b), 10 (c) и 20 s (d), поверхности после последовательного осаждения слоя золота в течение 5 s и распыления за 4 min (e), осаждения в течение



**Рис. 1.** АСМ изображения наноразмерных островков германия на исходной поверхности кремния (*a*), после осаждения нанослоя золота (*b–d*) и после распыления ионами аргона (*e–f*).

10 с и распыления за 4 мин (*f*). На вставках показаны поперечные сечения отмеченных на рисунке характерных наноразмерных островков германия. Очевидно, что для однозначного рассмотрения эволюции рельефа поверх-

ности после каждого цикла осаждения–распыления нанослоя золота недостаточно пользоваться только результатами АСМ. Однако серия АСМ изображений (рис. 1) в целом указывает на осаждение золота в виде острых



**Рис. 2.** Селективное распыление наностроек германия в виде пирамид.

вершук на куполах (domes) и тонких слоев вдоль боковых граней пирамид, утолщающихся от вершины к основанию. Одновременно наблюдается захоронение пирамид по мере увеличения толщины слоя золота на участках поверхности, свободной от островков германия (рис. 1, *b–d*). Ионное облучение в течение 4 min оказывается достаточным для распыления слоя золота, нанесенного в течение 5 s, и начала распыления наностроек германия (рис. 1, *e*). Вместе с тем слой золота, нанесенный в течение 10 s, удаляется только частично после распыления в течение 4 min (рис. 1, *f*). Это подтверждается также результатами измерения электросопротивления и оптического поглощения в случае кварцевых подложек. Видно также, что после ионного

распыления происходит уширение островков германия в виде куполов (вставки на рис. 1, *e, f*). Здесь процессы осаждения и распыления характеризуются не скоростями, а длительностью из-за неравномерности протекания этих процессов на поверхности со сложным рельефом в течение исследуемых интервалов времени. Согласно рис. 1, удаление наиболее мелких островков германия наблюдается после осаждения слоя золота в течение более чем 10 s и распыления поверхности ионами аргона в течение более чем 4 min. На рис. 2 приведены АСМ изображения поверхностей, которые распылялись в течение 8 min после осаждения слоя золота в течение 10 (*a*), 20 (*b*) и 30 s (*c*). Рис. 2, *a* показывает полное распыление пирамид, частичное распыление куполов (domes) и образование сложного рельефа на участках поверхности, свободной от островков германия, из-за ее частичного распыления после удаления маскирующего слоя золота. На рис. 2, *b* после распыления наблюдаются только следы остатков от пирамид, а наностройки германия в виде куполов (domes) остаются близкими по форме и размерам к куполам на исходной поверхности (рис. 1, *a*). Пирамиды на рис. 2, *c*, как и купола (domes), оказываются частично захороненными под не полностью удаленным слоем золота. Последнее следовало ожидать, потому что в течение 30 s осаждается наиболее толстый слой золота (около 4 nm) из всех рассмотренных случаев.

Таким образом, экспериментально подобранные режимы ионно-лучевого осаждения–распыления нанослоя золота позволяют селективно удалять с поверхности кремния наиболее мелкие по размерам наностройки германия, в том числе и в виде пирамид, оставляя неизменными крупные наностройки в виде куполов (domes). Это существенно увеличивает однородность распределения наностроек германия по размерам. Последнее представляет существенный интерес в проблеме формирования гладких поверхностей с нановыступами определенного размера.

В заключение авторы выражают благодарность D. Grützacher (Laboratory for Micro- and Nanotechnology, Paul Scherrer Institute, Switzerland) за предоставленные образцы рабочих структур и конструктивную критику.

## Список литературы

- [1] Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Шукин В.А. и др. // Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32. № 4. С. 385–410.
- [2] Medeiros-Ribeiro G., Bratkoski A.M., Kamins Th.I. et al. // Science. 1998. Vol. 279. P. 353–355.
- [3] Leifeld O., Hartmann R., Müller E. et al. // Nanotechnology. 1999. N 10. P. 122–126.
- [4] Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Стукалов О.М. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 1. С. 39–48.
- [5] Smentkowski V.S. // Progress in Surf. Sci. 2000. Vol. 64. P. 1–58.
- [6] Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Тушина С.Д., Калинин С.В. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 6. С. 86–89.