

06;10

Изменение формы крупных наноостровков германия на поверхности кремния путем облучения медленными ионами

© А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, О.М. Стукалов,
А.И. Демченко, В.И. Хитько

Минский НИИ радиоматериалов, Беларусь

E-mail: stognij@ifftp.bas-net.by

Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси

E-mail: novitski@ifftp.bas-net.by

Поступило в Редакцию 25 июля 2003 г.

В окончательной редакции 24 ноября 2003 г.

Подложки кремния, содержащие на поверхности наноостровки германия, облучались ионами водорода и аргона с энергией менее 350 eV. Обнаружено деление крупных островков германия на несколько мелких на начальном этапе облучения, причем независимо от типа ионов. Показана устойчивость полученной поверхности, более однородной по сравнению с исходной, к дальнейшему воздействию облучения.

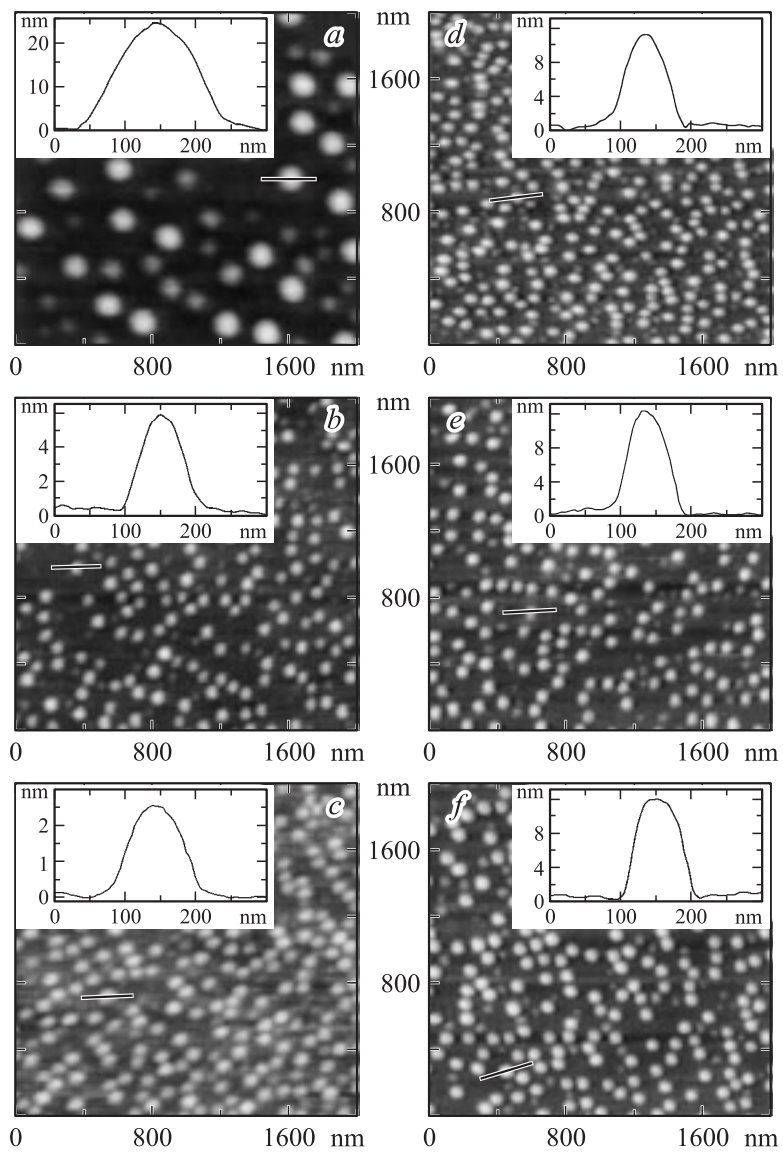
Структуры с квантовыми точками представляют интерес для создания полупроводниковых приборов нанoeлектроники [1,2]. Одним из типов таких структур являются подложки кремния, на поверхности которых методами молекулярно-лучевой эпитаксии сформированы наноостровки германия [3–4]. Образование островков обусловлено релаксацией упругих напряжений, возникающих на границе раздела материалов из-за рассогласования значений постоянных кристаллических решеток и коэффициентов термического расширения. Однако в силу ряда причин, например из-за наличия дефектов на границах раздела, в осаждаемых слоях и подложке, процесс релаксации напряжений приводит к образованию наноостровков, отличающихся по форме и размерам. Для получения более упорядоченной картины можно воспользоваться дополнительными термообработками, когда в силу увеличения термических напряжений реализуются условия для более

полной релаксации упругих напряжений [5]. К сожалению, в этом случае термическое воздействие оказывается на всю исходную структуру, поэтому одновременно активируются другие нежелательные процессы, например диффузионные, на границе раздела кремний–германий.

В настоящей статье предлагается использовать постростовое облучение потоком медленных ионов для получения более однотипных наностроек германия на поверхности кремния. Использование ионного облучения, в отличие от термоотжига, позволяет создавать дополнительные напряжения только в области участков поверхности, доступных для облучения. Воздействие медленными ионами протекает в контролируемых условиях, а использование отличающихся по массе ионов позволяет учесть влияние процессов ионного распыления и глубины пробега ионов в мишени [6].

На рисунке показаны исходный вид поверхности подложки (см. рисунок, *a*) и изменения на поверхности, произошедшие после облучения ионами аргона (см. рисунок, *b* — в течение 4 min, *c* — в течение 8 min) или после облучения ионами водорода (см. рисунок, *d* — в течение 2 min, *e* — 5 min, *f* — в течение 8 min). Подробно методика получения ансамбля наностроек германия методом молекулярно-лучевой эпитаксии исследуемых здесь образцов описана в [4]. Рабочие структуры на пластине кремния диаметром 100 mm были любезно предоставлены dr. D. Grützmacher. Образцами служили отколотые от пластины соседние участки. Изображения поверхности получены при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ) „Фемтоскан-001“ (Центр перспективных технологий, МГУ, Москва) с полем сканирования до $5 \times 5 \mu\text{m}$, работающего в контактном режиме с использованием кремниевых кантилверов CSC12, изготовленных фирмой MicroMasch (www.spm-tis.com). На вставках к рисункам показаны сечения рельефа поверхности в области выбранных наиболее крупных наностроек германия. Для облучения использовался источник ионов с холодным полым катодом на основе двухкаскадного самостоятельного разряда низкого давления [7]. Условия облучения: предельное давление ниже $2 \cdot 10^{-5}$ Torr, рабочее давление $4 \cdot 10^{-4}$ Torr, энергия ионов менее 350 eV (согласно тормозным характеристикам трехсеточного зонда-энергoанализатора), плотность тока ионов в пучке 0.08 mA/cm^2 , температура подложки при облучении не более 20°C .

Анализ результатов показывает, что после облучения в течение первых двух-четырёх минут и независимо от типа ионов наблюдается



Изменение морфологии рельефа поверхности после ионного облучения.

разделение наиболее крупных островков на три-четыре более мелких. Далее процесс деления прекращается. Особенно наглядно это демонстрируют АСМ-изображения для образцов, облученных водородом. На рисунке, *d-f* на поверхности образцов, облученных в течение 2–8 мин ионами водорода, отсутствуют крупные наностройки высотой до 30 нм, как это имеет место на исходной поверхности. Высота наиболее крупных наностроек не превосходит 12 нм, количество островков увеличивается в 3–4 раза. Воздействие облучения ионами аргона происходит более сложным путем. Согласно рис. 1, *b-c*, как наряду с делением крупных островков в первые минуты облучения, так и в дальнейшем активное влияние на вид поверхности оказывают процессы распыления. После деления и по мере облучения крупные и мелкие островки продолжают уменьшаться по высоте, расплываются в поперечных размерах, а свободная от островков поверхность приобретает более шероховатый вид. Действительно, согласно литературным данным [8], в силу малости массы, низкой энергии и дозы облучения, процессами эрозии поверхности при облучении ионами водорода можно пренебречь. Однако в случае ионов аргона этого делать нельзя и следует учитывать, что коэффициент распыления германия составляет порядка 0.2–0.3 atom/ion, и он более чем в два раза превышает значение коэффициента распыления для плоской поверхности кремния. В результате этого скорость распыления островков германия по оценкам на 1–2 nm/min превышает скорость распыления поверхности кремния, что согласуется со скоростью уменьшения высоты крупных островков на рисунке, *b-c*.

Таким образом, облучение ионами водорода или аргона позволяет получить более однородную по сравнению с исходной картину распределения наностроек германия на кремнии. Это происходит на начальном этапе облучения в результате деления крупных островков на три-четыре мелких. Причины деления островков могут быть связаны с дополнительными напряжениями в поверхностном слое крупных островков, вносимыми при ионном облучении. Так как островки находятся в исходном неравновесном состоянии, эти дополнительные напряжения оказываются достаточными для стимулирования процесса релаксации суммарных избыточных напряжений путем деления островков. Дальнейшее облучение, если не принимать во внимание изменения, обусловленные распылением ионами аргона, не оказывает влияния на вид полученной поверхности.

В заключение авторы выражают благодарность д-ру D. Grützmacher (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] *Alchalabi K., Zimin D., Kostoroz G., Zogg H.* // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90. P. 026104.
- [3] *Medeiros-Ribeiro G., Bratkovski A.M., Kamins Th.I.* et al. // Science. 1998. V. 279. P. 353–355.
- [4] *Leifeld O., Hartmann R., Müller E.* et al. // Nanotechnology. 1999. N 10. P. 122–126.
- [5] *Schmidt O.G., Lange C., Eberl K.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. P. 2340–2343.
- [6] *Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Стукалов О.М.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 2. С. 6–13.
- [7] *Стогний А.И., Корякин С.В.* // ПТЭ. 2000. № 6. С. 64–67.
- [8] *Smentkowski V.S.* // Progress in Surface Science. 2000. V. 64. P. 1–58.