

## ЭФФЕКТЫ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ГЕТЕРОЭПИТАКСИИ Ge/Si ИЗ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ

А.В.Двуреченский<sup>1)</sup>, В.А.Зиновьев, В.А.Кудрявцев, Ж.В.Смагина

*Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН  
630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 26 июня 2000 г.

Методом дифракции быстрых электронов на отражение экспериментально исследовано изменение морфологии поверхности псевдоморфной пленки Ge на Si при облучении собственными низкоэнергетическими (230 эВ) ионами в процессе гетероэпитаксии из молекулярных пучков. Обнаружено, что облучение непрерывным пучком ионов приводит к уменьшению критической толщины пленки Ge, при которой происходит переход от двумерно-слоевого к трехмерному росту. Установлено, что импульсное (0.5 с) ионное воздействие в моменты времени, соответствующие степени заполнения слоя  $> 0.5$ , вызывает усиление интенсивности зеркального рефлекса, что соответствует снижению шероховатости поверхности роста.

PACS: 61.14.Hg, 61.80.-x, 68.55.-a

Идея использования морфологических изменений поверхности в процессе роста рассогласованных гетероэпитаксиальных систем оказалась весьма плодотворной в формировании нового подхода к созданию наноструктур с квантовыми точками [1–3]. Происходящие морфологические изменения управляются механическими напряжениями в растущей пленке. В результате плоский фронт эпитаксиального роста сохраняется до некоторой критической толщины пленки, после чего фронт становится подобным рельефу плоскости с расположенными на ней пирамидами. В вершинах пирамид происходит релаксация упругих деформаций. Управление процессом формирования пирамид (размер, форма, плотность) основывается преимущественно на многочисленных результатах исследований гетероэпитаксии в зависимости от температуры подложки и молекулярного потока. Независимую возможность в управлении процессом эпитаксии способно дать воздействие частиц, имеющих достаточно большую энергию по сравнению с энергией частиц в молекулярном пучке, но недостаточную для генерации дефектов в объеме эпитаксиальной пленки (и подложки). Энергия частиц в молекулярном пучке определяется характерной температурой источника частиц. Ее величина не превышает 0.1 эВ. Использование “сверхтепловых” частиц (энергия 100 эВ) при осаждении пленок приводило к сильным изменениям в кинетике роста и результирующих физических свойствах пленок различных материалов, включая элементарные полупроводники (см., например, [4, 5]), полупроводниковые соединения (см., например, [6]), металлы (см., например, [7]). При этом наблюдается ряд физических эффектов, таких как снижение температуры эпитаксии, уменьшение глубины рельефа растущей поверхности.

Цель настоящей работы заключается в исследовании морфологических изменений поверхности псевдоморфной пленки Ge на Si при облучении низкоэнергетическими ионами в процессе гетероэпитаксии из молекулярных пучков.

<sup>1)</sup> e-mail: dvurech@isp.nsc.ru

Эксперименты выполнялись в сверхвысоковакуумной камере с давлением остаточных газов  $< 10^{-8}$  Па. Осаждение пленок германия осуществлялось из тигля (нитрид бора) на кремневую подложку. Пластины Si имели ориентацию (111) в пределах  $0.15^\circ$ , согласно данным рентгеновской дифракции. Плотность потока германия варьировалась в пределах  $10^{12} - 10^{15}$  см $^{-2}$ ·с $^{-1}$  с помощью изменения температуры тигля. Над тиглем располагалась система ионизации и ускорения ионов германия. Ионизация молекулярного потока Ge осуществлялась поперечным пучком электронов. Доля ионизации молекулярного пучка германия в системе зависела от конструкции источника и составляла 0.1% и 0.5%. Блок импульсной подачи ускоряющего напряжения позволял создавать импульсы ионного тока с длительностью 0.1 – 1 с, энергия ионов Ge $^+$  варьировалась в пределах 50 – 270 эВ. Угол падения молекулярного и ионного пучков на подложку составлял  $54.5^\circ$ .

В качестве метода исследования использовалась техника дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение с фиксированием осцилляций интенсивности зеркального рефлекса при послойном росте пленки. При проведении экспериментов использовались режимы облучения как импульсным, так и непрерывным пучком низкоэнергетических ионов. Импульсное воздействие пучка ионов на растущую поверхность германия осуществлялось в различные стадии роста (толщина пленки, степень заполнения поверхностного слоя). Эксперименты были выполнены в диапазоне температур от 250 до 550 °С.

При осаждении германия из молекулярного пучка на поверхность Si(111) наблюдались осцилляции интенсивности зеркального рефлекса ДБЭ (см. рис.1 и рис.2, кривые 1). Период осцилляций равен времени осаждения одного биатомного слоя ( $1 \text{ бс} = 1.56 \times 10^{15}$  атомов/см $^2$ ). После осаждения нескольких бислоев происходил срыв осцилляций, что связано с переходом от двумерно-слоевого к трехмерному (2D-3D) механизму роста островков Ge при достижении пленкой критической толщины. В области температур 250 – 400 °С наблюдалось три осцилляции, в интервале 450 – 550 °С – две осцилляции интенсивности сигнала ДБЭ. Наблюдаемый в наших условиях 2D-3D переход соответствует известным литературным данным по гетероэпитаксии в системе Ge/Si(111) из молекулярного пучка [8 – 10].

При включении системы ионизации и приложении ускоряющего напряжения в процессе гетероэпитаксии нами были получены следующие результаты для потока 0.15 бс/с и доли ионизации 0.1%.

Облучение непрерывным потоком ионов при температуре 250 °С приводило к уменьшению числа ДБЭ осцилляций (рис.1б, кривая 2), по сравнению с числом осцилляций при обычной эпитаксии, а также при эпитаксии в условиях импульсного воздействия пучка ионов.

В интервале температур 300 – 350 °С облучение непрерывным пучком ионов не приводило к заметным изменениям процесса гетероэпитаксии по сравнению с эпитаксией из молекулярного пучка. Импульсное воздействие перед максимумом каждой осцилляции вызывало возрастание интенсивности зеркального рефлекса, что естественно связать с выглаживанием рельефа растущей поверхности (рис.1а, кривая 3).

Эффект уменьшения числа осцилляций при облучении непрерывным пучком низкоэнергетических ионов наблюдался также при температуре 350 °С (рис.1а, вставка), в условиях эксперимента соответствующей более высокой плотности ионного тока

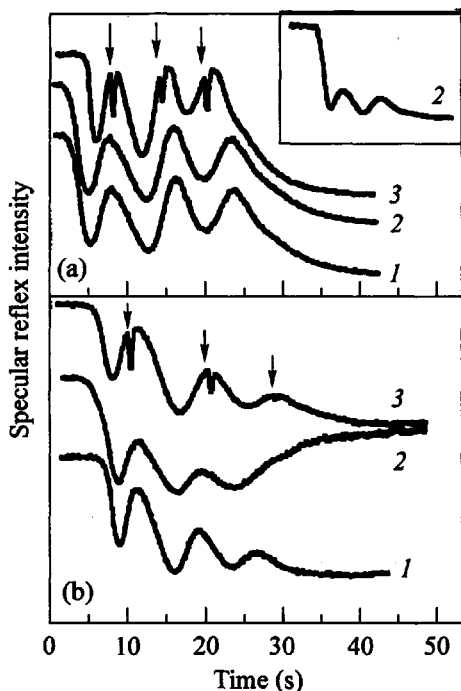


Рис.1. Изменение интенсивности зеркального рефлекса ДБЭ в процессе гетероэпитаксии Ge/Si(111) из молекулярного пучка (1), при одновременном непрерывном (2) и импульсном (3) воздействии пучком низкоэнергетических ионов для различных температур подложки: а) 350 °С, б) 250 °С. Скорость осаждения  $F \approx 0.15$  бс/с, степень ионизации 0.1%, энергия ионов  $\text{Ge}^+$  в пучке – 230 эВ, длительность импульса ионного тока – 0.5 с. Моменты импульсного ионного воздействия отмечены стрелками. Вставка: степень ионизации 0.5%

(доля ионизации 0.5%). В этом случае наблюдалось две осцилляции, в то время как при эпитаксии из молекулярного пучка фиксировалось три осцилляции.

Нами были выполнены эксперименты при более низких скоростях осаждения ( $< 0.15$  бс/с), что соответствует меньшему отклонению от равновесия в процессе роста. Здесь также был обнаружен эффект возрастания интенсивности ДБЭ после импульсного ионного воздействия (рис.2а, кривая 3) и эффект уменьшения числа ростовых осцилляций (рис.2б, кривая 2) при непрерывном ионном воздействии.

При взаимодействии ускоренных частиц с поверхностью твердого тела происходит ряд явлений, которые необходимо проанализировать для установления механизмов, способных дать вклад в наблюдаемые нами эффекты изменения числа осцилляций и их интенсивности при воздействии пучком низкоэнергетических ионов в разных температурных областях гетероэпитаксии Ge на Si. К этим явлениям относятся:

- 1) распыление материала, что соответствует эффективному снижению потока атомов на поверхность при осаждении из молекулярного пучка;
- 2) нагрев поверхностного слоя за счет выделившейся энергии ускоренных частиц;
- 3) изменение кинетики зарождения и распада островков на поверхности Ge вследствие генерации адатомов и поверхностных вакансионных кластеров;
- 4) ионно-стимулированный сверхструктурный фазовый переход, вызванный выделением энергии ускоренных частиц.

Роль первых двух факторов анализировалась нами в работах [11–13] применительно к гомоэпитаксии Si, где был сделан вывод, что связанные с ними процессы не дают существенного вклада в изменение морфологии поверхности в процессе роста. Данный вывод сохраняет силу для гетероэпитаксии Ge из ионно-молекулярных

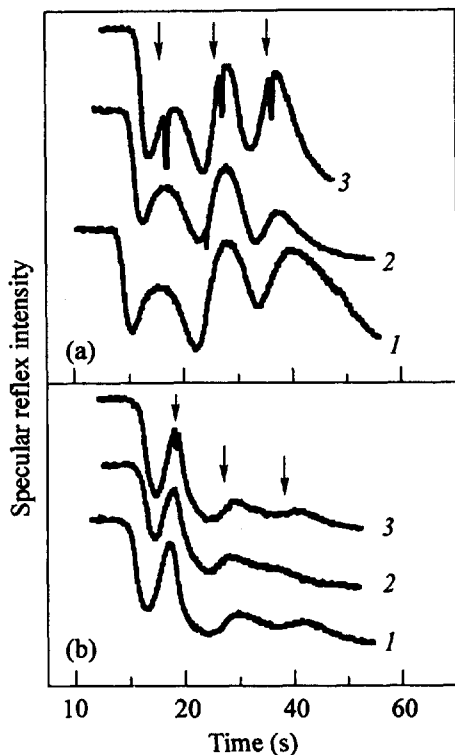


Рис.2. То же, что на рис.1 для меньшего потока Ge:  $F \approx 0.1$  бс/с. Температура подложки: а)  $350^\circ\text{C}$ , б)  $250^\circ\text{C}$

пучков, поскольку в наших условиях использовались близкие энергии и интегральные потоки ионов.

Изменение числа осцилляций интенсивности сигнала ДБЭ при непрерывном ионном воздействии по сравнению с условиями обычного роста из молекулярных пучков, можно интерпретировать как изменение критической толщины пленки ( $h_c$ ) для 2D-3D перехода. Сокращение числа осцилляций соответствует уменьшению  $h_c$  при гетероэпитаксии с одновременным облучением непрерывным пучком ионов. Здесь, по-видимому, доминирующим механизмом изменения морфологии поверхности является ионно-стимулированное зарождение трехмерных островков Ge на поверхности растущего слоя, что обеспечивает снятие упругих деформаций в системе Ge/Si [14]. Этот механизм может приводить к наблюдаемому уменьшению  $h_c$ .

Проведение гетероэпитаксии при более высоких температурах подложки и сохранении параметров пучков способствует отжигу центров зарождения трехмерных островков Ge, вводимых облучением, и следовательно, уменьшению их вклада в изменение кинетики роста. Этим, по-видимому, объясняется практически идентичный ход интенсивности сигналов ДБЭ при эпитаксии из молекулярного пучка и непрерывного ионно-молекулярного с долей ионизации 0.1% (рис.1а). Увеличение плотности ионного тока (для доли ионизации 0.5%) приводит к росту темпа генерации центров зарождения, поэтому естественно ожидать изменения кинетики роста при тех температурах подложки, для которых эффекты ионного воздействия не проявлялись при доли ионизации 0.1%. Именно такой результат демонстрирует вставка на рис.1.

В условиях импульсного воздействия интегральный поток ионов за время роста псевдоморфной пленки в  $\sim 20$  раз меньше, чем при облучении непрерывным пучком. Наблюдаемый эффект возрастания интенсивности зеркального рефлекса ДБЭ после импульсного ионного воздействия (рис.1а, кривая 3) при гетероэпитаксии Ge на Si указывает на то, что поверхностная плотность мест рассеяния электронов, которыми являются границы островков и вакансионных кластеров, уменьшается. Уменьшение шероховатости растущего слоя при импульсном воздействии пучком ионов  $\text{Ge}^+$  с энергией около 200 эВ перед максимумом ростовой осцилляции, по-видимому, связано с увеличением коэффициента диффузии адатомов в результате ионно-стимулированной реконструкции поверхности Ge(111): переход от сверхструктуры  $(7 \times 7)$  к  $(5 \times 5)$ . Свехструктурный фазовый переход, индуцированный импульсным ионным воздействием, наблюдался нами при гомоэпитаксии Si(111). Обнаруженный переход  $(5 \times 5) \rightarrow (7 \times 7)$  приводил к уменьшению энергии активации поверхностной диффузии атомов и снижению шероховатости растущей поверхности при импульсном воздействии пучком низкоэнергетических ионов [12, 13]. Эффект был максимален, если импульсное воздействие осуществлялось при степени заполнения слоя, равной 0.8.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 99-02-17196) и программы по направлению "Поверхностные атомные структуры" (проект # 4.2.99).

- 
1. Н.Н.Леденцов, В.М.Устинов, В.А.Шукин и др., ФТП **32**, 385 (1998).
  2. А.В.Двуреченский, А.И.Якимов, Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники **4**, 4 (1999).
  3. O.P.Pchelyakov, Yu.B.Bolkhovityanov, A.V.Dvurechenskii et al., Thin Solid Films, **367**, 75 (2000).
  4. J.W.Rabalais, A.H.Al-Bayati, K.J.Boyd et al., Phys. Rev. **B53**, 10781 (1996).
  5. N.E.Lee, G.A.Tomash, and J.E.Greene, Appl. Phys. Lett. **65**, 3236 (1994).
  6. S.W.Park, J.Y.Shim, and H.K.Baik, J. Appl. Phys. **78**, 5993 (1995).
  7. G.Rosenfeld, R.Servaty, C.Teichert et al., Phys. Rev. Lett. **71**, 895 (1993).
  8. O.P.Pchelyakov, V.A.Markov, A.I.Nikiforov et al., Thin Solid Films **306**, 299 (1997).
  9. B.Voigtlander and A.Zinner, Appl. Phys. Lett. **63**, 3055 (1993).
  10. U.Kohler, O.Jusko, G.Pietsch et al., Surf. Sci. **248**, 321 (1991).
  11. А.В.Двуреченский, В.А.Зиновьев, В.А.Марков и др., Письма в ЖЭТФ **64**, 689 (1996).
  12. A.V.Dvurechenskii, V.A.Zinovyev, V.A.Markov, and V.A.Kudryavtsev, Surf. Sci. **425**, 185 (1999).
  13. А.В.Двуреченский, В.А.Зиновьев, В.А.Марков, ЖЭТФ **114**, 2055 (1998).
  14. A.A.Shklyev, M.Shibata, and M.Ichikawa, Thin Solid Films **343/344**, 532 (1999).