

Релаксированные буферные слои $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$, выращенные методом газофазной эпитаксии при атмосферном давлении

© Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, О.А. Кузнецов*,
А.В. Новиков, В.А. Перевощиков*, М.В. Шалеев

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

* Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: anov@ipm.sci-nnov.ru

Методом газофазной эпитаксии при атмосферном давлении выращены релаксированные градиентные буферные слои $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$, имеющие низкую плотность прорастающих дислокаций. За счет применения химико-механической полировки поверхности слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ ($x \sim 25\%$) удалось понизить шероховатость их поверхности до значений, сравнимых с шероховатостью поверхности исходных подложек $\text{Si}(001)$. Продемонстрировано, что полученные буферные слои $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ с низкой плотностью прорастающих дислокаций и малой шероховатостью поверхности могут быть использованы в качестве искусственных подложек для выращивания различных SiGe/Si -гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии.

Работа выполнена при финансовой поддержке программ Минпромнауки РФ, Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-02-16792), и программы BRHE (проект N Y1 P-01-05).

Применение SiGe -гетероструктур в современной полупроводниковой технологии позволяет значительно улучшить характеристики уже используемых приборов на основе кремния, а также открывает возможности создания новых оптоэлектронных устройств, совместимых с современной Si -технологией. Ключевым моментом, связанным с созданием большинства приборов на основе SiGe -гетероструктур, является формирование температурно-стабильного релаксированного буферного слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, имеющего низкую ($< 10^6 \text{ cm}^{-2}$) плотность прорастающих дислокаций и малую шероховатость поверхности [1]. Одним из способов, используемых в настоящее время для получения высококачественных буферных слоев SiGe , является их выращивание методами газофазной эпитаксии (ГФЭ) [2]. Метод ГФЭ позволяет выращивать SiGe -структуры с большими ($10 \mu\text{m}/\text{h}$ и выше) скоростями осаждения. Это становится особенно важным при росте градиентных буферных слоев SiGe , в которых градиент доли Ge не превышает $10\%/\mu\text{m}$, а суммарная толщина составляет несколько микрометров. Однако из-за существенного уменьшения скорости роста при понижении температуры подложки применение методов ГФЭ становится эффективным только при высоких температурах роста. Использование высоких температур роста может приводить к значительному увеличению шероховатости поверхности буферного слоя за счет перехода от двумерного к трехмерному росту слоя SiGe [3] и развития характерной картины неровностей (crosshatch-картина), связанной с наличием в структуре двумерной сетки дислокаций несоответствия [4]. Развитие шероховатости поверхности буферного слоя оказывает отрицательное влияние на транспортные свойства структур, сформированных на этом слое, а также затрудняет проведение литографических процессов. Недавно

для уменьшения шероховатости выращенных буферных слоев SiGe было предложено использовать химико-механическое полирование (ХМП) их поверхности [5].

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты, полученные при выращивании методом ГФЭ релаксированных градиентных буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$, имеющих низкую плотность прорастающих дислокаций. Показано, что ХМП выращенных буферных слоев позволяет значительно снизить шероховатость их поверхности. Полученные буферные слои $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ могут быть использованы в качестве искусственных подложек для выращивания SiGe -гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Структуры с буферными слоями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ были выращены на подложках $\text{Si}(001)$ методом гидридной ГФЭ при атмосферном давлении с использованием германа (GeH_4) и силана (SiH_4). Рост проводился в горизонтальном металлическом водоохлаждаемом реакторе с прямокавальным графитовым нагревателем [6]. После предварительной химической обработки Si подложки отжигались в реакторе в потоке водорода при $T \sim 1200^\circ\text{C}$. Затем на подложки осаждался буферный слой Si толщиной $\sim 2 \mu\text{m}$. Рост градиентных буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ проводился при температурах $1025\text{--}920^\circ\text{C}$ с градиентом концентрации Ge ($5\text{--}10\%/\mu\text{m}$). Увеличение доли Ge в растущем слое осуществлялось за счет понижения температуры роста и изменения соотношения потоков GeH_4 и SiH_4 . Скорость роста зависела от содержания Ge в бу-

ферном слое и находилась в интервале 2–4 nm/s. Максимальная концентрация Ge в выращенных буферных слоях составляла 5–45% при их суммарной толщине 2–7 μm . Для уменьшения шероховатости поверхности выращенные буферные слои SiGe подвергались ХМП с использованием специального раствора, состоящего из перекиси водорода, глицерина и аэросила [7]. Толщина удаляемого слоя менялась за счет изменения состава раствора, давления на структуру, времени полировки и определялась методами рентгенодифракционного анализа и с помощью взвешивания образцов до и после полировки.

Рост тестовых SiGe/Si-структур на полученных релаксированных буферных слоях, подвергнутых ХМП, проводился методом МПЭ из твердых источников. Испарение Ge и Si осуществлялось с помощью электронно-лучевых испарителей. Скорости роста слоев SiGe находились в диапазоне 0.01–0.1 nm/s. Плотность прорастающих дислокаций в выращенных буферных слоях определялась методами селективного травления. Рентгенодифракционные исследования выращенных структур выполнялись на двухкристальном дифрактометре ДРОН-4. Морфология поверхности структур исследовалась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) „Solver“ P4.

На $\omega-2\theta$ рентгеновских спектрах выращенных градиентных буферных слоев SiGe кроме пика от Si-подложки хорошо видны пики, соответствующие отдельным слоям $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с различным содержанием Ge. Согласно данным рентгенодифракционного анализа, степень релаксации упругих напряжений в отдельных слоях структур составляла 90–100%. Концентрация прорастающих дислокаций, определенная методом селективного травления, для выращенных буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с максимальным $x < 30\%$ была меньше 10^6 cm^{-2} . Известно [1], что при таких концентрациях прорастающие дислокации не оказывают существенного влияния на подвижность носителей заряда в SiGe/Si-гетероструктурах.

Исследования выращенных буферных слоев SiGe методами АСМ показали, что на их поверхности наблюдается характерная („crosshatch“) картина неровностей (рис. 1), связанная с наличием в структуре двумерной сетки дислокаций несоответствия [8]. Увеличение максимальной доли Ge в структуре приводит к росту числа дислокаций несоответствия, которое необходимо для релаксации упругих напряжений в слое SiGe. В результате этого с ростом доли Ge в выращенных слоях происходит уменьшение периода двумерной сетки неровностей и увеличение ее амплитуды (рис. 1), что приводит к росту шероховатости поверхности структур. Средняя квадратичная шероховатость поверхности буферных слоев, определенная из АСМ-снимков, увеличивается с $\sim 3 \text{ nm}$ для буферных слоев с максимальным $x \leq 10\%$ до значений 6–10 nm для структур с максимальным $x \sim 25\%$ (рис. 2). Необходимо отметить, что данные значения примерно на порядок больше шероховатости поверхности исходных подложек Si(001) и буферного слоя

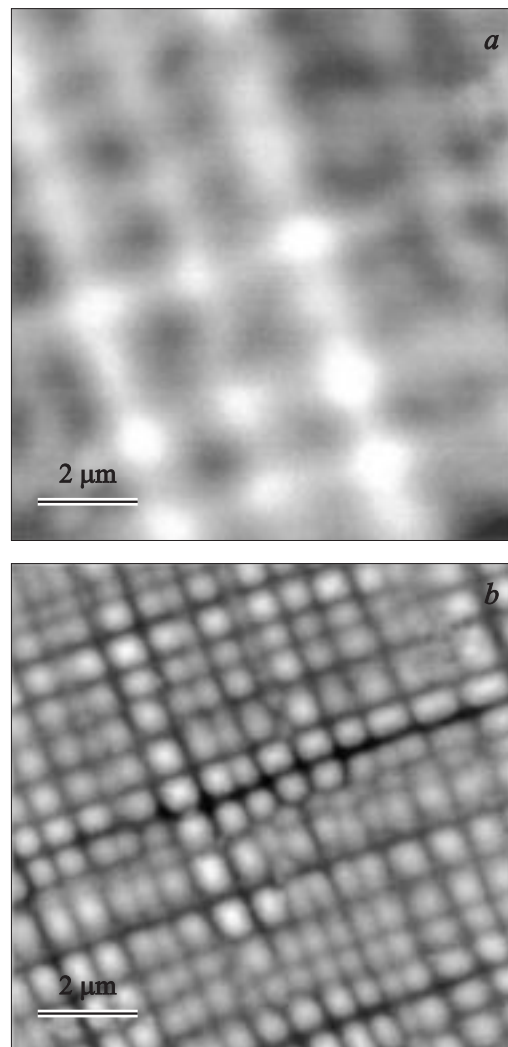


Рис. 1. АСМ-снимки поверхности буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с максимальным содержанием Ge $x = 20$ (a) и 45% (b). Максимальный перепад высот на АСМ-снимках равен 40 (a) и 200 nm (b).

Si, выращенного методом МПЭ на подложке Si(001) (рис. 2). Большие значения шероховатости поверхности выращенных градиентных буферных слоев SiGe/Si связаны с высокими ($T > 900^\circ\text{C}$) температурами роста, используемыми в методе ГФЭ.

Для уменьшения шероховатости поверхности выращенные структуры были подвергнуты ХМП. Оптимизация условий ХМП позволила получить релаксационные буферные слои $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с максимальным содержанием Ge $x \sim 25\%$ и малой шероховатостью поверхности. Как показали сравнительные АСМ-исследования поверхности буферных слоев до и после полировки, ХМП при оптимальных условиях позволяет полностью удалить с поверхности неровности, связанные с сеткой дислокаций несоответствия (рис. 1 и 3). В результате процедуры ХМП шероховатость поверхности буферных слоев с максимальной долей Ge $x < 30\%$ уменьшается пример-

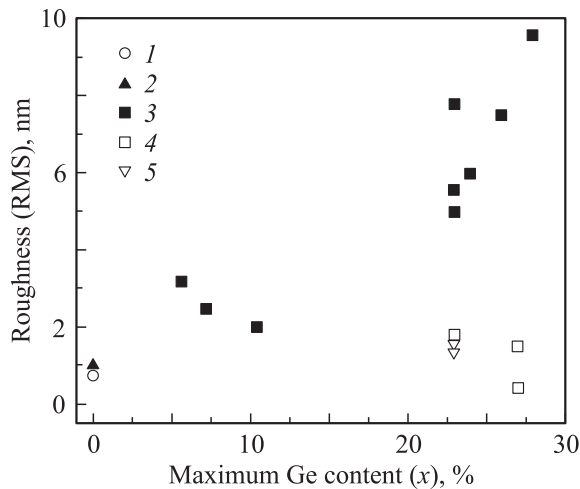


Рис. 2. Шероховатость поверхности выращенных SiGe-структур в зависимости от максимальной доли Ge в буферном слое: 1 — подложка Si(001), 2 — буферный слой Si, выращенный на подложке Si(001) методом МПЭ, 3 — буферные слои SiGe, выращенные методом ГФЭ, 4 — буферные слои SiGe после ХМП, 5 — SiGe/Si-структуры, выращенные методом МПЭ на буферных слоях SiGe, подвергнутых ХМП. Для определения шероховатости поверхности использовались АСМ-снимки размером $10 \times 10 \mu\text{m}^2$.

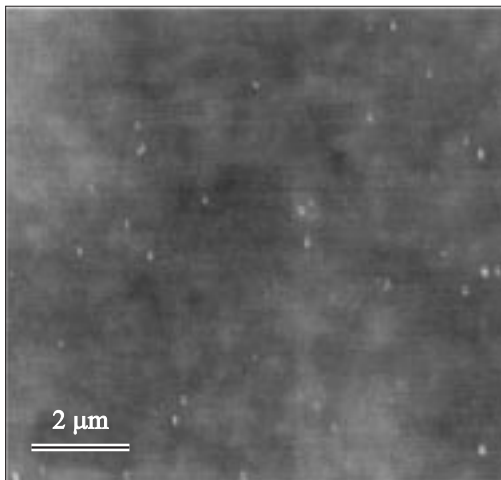


Рис. 3. АСМ-снимок поверхности буферного слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с максимальным содержанием Ge $x \sim 25\%$ после ХМП. Максимальный перепад высот на АСМ-снимке равен 10 nm.

но на порядок и становится сравнимой с шероховатостью исходных подложек Si(001) (рис. 2).

Полученные структуры с релаксированными градиентными буферными слоями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$, подвергнутые ХМП, были использованы в качестве искусственных подложек для выращивания SiGe/Si-гетероструктур методом МПЭ. Для удаления загрязнений, связанных с проведением ХМП, буферные слои перед ростом были последовательно обработаны в органических и неорганических реагентах. Финальная очистка проводи-

лась за счет отжига структуры при температуре 800°C в ростовой камере установки МПЭ. Были выращены тестовые структуры с ненапряженным слоем SiGe и решеткой SiGe/Si, в которой состав и толщины слоев были подобраны таким образом, чтобы взаимно компенсировать упругие напряжения в одном периоде структуры. Температура роста структур составляла 600°C . АСМ-исследования поверхности выращенных структур показали, что предварительный отжиг буферных слоев при 800°C не приводит к повторному возникновению на поверхности неровностей, связанных с сеткой дислокации несоответствия. Шероховатость поверхности SiGe/Si-гетероструктур, выращенных методом МПЭ на полученных буферных слоях SiGe, сравнима с шероховатостью поверхности исходных подложек Si(001) (рис. 2). Рентгенодифракционные исследования показали структурное совершенство структур, выращенных методом МПЭ.

Список литературы

- [1] F. Schaffler. *Semicond. Sci. Technol.* **12**, 1515 (1997).
- [2] D.J. Paul, A. Ahmed, N. Griffin, M. Pepper, A.C. Churchill, D.J. Robbins, D.J. Wallis. *Thin Solid Films* **321**, 181 (1998).
- [3] H. Sunamura, Y. Shiraki, S. Fukatsu. *Appl. Phys. Lett.* **66**, 953 (1995).
- [4] J.L. Liu, S. Tong, Y.H. Luo, J. Wan, K.L. Wang. *Appl. Phys. Lett.* **79**, 3431 (2001).
- [5] K. Sawano, K. Kawaguchi, T. Ueno, S. Koh, K. Nakagawa, Y. Shiraki. *Mater. Sci. Eng. B* **89**, 406 (2002).
- [6] О.А. Кузнецов, Л.К. Орлов, Ю.Н. Дроздов, В.М. Воротынецев, М.Г. Мильвидский, В.И. Вдовин, Р. Карлес. *ФТП* **27**, 1591 (1993).
- [7] В.А. Перевошиков, В.Д. Скупов. Особенности абразивной и химической обработки поверхности полупроводников. Изд-во Нижегород. ун-та, Н. Новгород (1992).
- [8] M.A. Lutz, R.M. Feenstra, F.K. LeGoues, P.M. Money, J.O. Chu. *Appl. Phys. Lett.* **66**, 724 (1995).