

Сегрегация сурьмы в напряженных SiGe-гетероструктурах, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии

© М.Н. Дроздов*, А.В. Новиков*+, Д.В. Юрасов*¶

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

+ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 22 апреля 2013 г. Принята к печати 30 апреля 2013 г.)

Для напряженных SiGe-структур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, экспериментально исследовано влияние на сегрегацию сурьмы температуры роста, компонентного состава и упругих напряжений отдельных слоев. Установлено, что условия роста и параметры структуры оказывают взаимосвязанное воздействие на сегрегацию Sb: степень влияния состава и упругих напряжений SiGe-слоев на сегрегацию Sb зависит от температуры роста. Показано, что использование ранее предложенного авторами метода селективного легирования кремниевых структур с учетом полученных зависимостей сегрегации Sb от условий роста и параметров SiGe-слоев позволяет формировать селективно-легированные сурьмой SiGe-структуры.

1. Введение

Для создания многих устройств современной кремниевой микроэлектроники, таких как быстродействующие полевые и биполярные транзисторы, резонансно-туннельные диоды, светоизлучающие и фотоприемные устройства и т.п., необходимо формирование в одной эпитаксиальной структуре слоев с различным типом и концентрацией легирующей примеси. Это требует развития методов контролируемого легирования кремния и гетероструктур на его основе при их эпитаксиальном росте. Однако хорошо известно [1,2], что для донорных примесей в кремнии и SiGe-структурах существует проблема их контролируемого внедрения в объем полупроводника, связанная с тем, что для всех основных доноров (Sb, As и P) ярко выражен эффект сегрегации. Он заключается в том, что атомам примеси выгоднее находиться на поверхности роста, нежели встраиваться в объем структуры, и они „всплывают“ на поверхность при заращивании атомов примеси атомами Si и (или) Ge. В результате происходит перераспределение атомов примеси, существенным образом искажающее профиль легирования и значительно осложняющее создание селективно-легированных областей *n*-типа в Si и SiGe.

Одной из наиболее широко используемых донорных примесей для структур на основе Si является Sb, что связано с легкостью ее контролируемого испарения и низким давлением собственных паров [3]. К настоящему времени сегрегация Sb в Si исследована различными группами [3–6] и предложены различные методы ее подавления (см. [1] и ссылки в нем). Ранее авторами был предложен оригинальный метод селективного легирования кремниевых эпитаксиальных структур, основанный на контролируемом использовании эффекта сегрегации примеси [7]. В настоящей работе исследовалась возможность распространения этого метода для создания

селективно-легированных SiGe-гетероструктур, необходимых для практических приложений.

В отличие от системы Si:Sb, сегрегация в системе SiGe:Sb зависит не только от условий роста (температуры и скорости роста), но и от параметров самой структуры (компонентного состава и упругих напряжений отдельных слоев). В работе исследованы сегрегационные свойства Sb в SiGe-структурах, выращенных на подложках Si(001) и релаксированных буферных слоях SiGe, в зависимости от температуры роста и параметров структур. Показано, что условия роста и параметры SiGe-структур оказывают взаимосвязанное воздействие на сегрегацию Sb: степень влияния состава и упругих напряжений отдельных слоев на сегрегацию Sb зависит от температуры роста.

2. Эксперимент

Исследуемые SiGe-структуры были выращены на установке молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) Riber Siva-21. Осаждение Si и Ge осуществлялось с помощью электронно-лучевых испарителей, Sb испарялась из эффузионной ячейки. Контроль испаряемых потоков Si и Ge осуществлялся с помощью квадрупольного масс-спектрометра „Hiden Analytical HAL-2321“ и кварцевых датчиков измерения толщины. Температура подложки измерялась с помощью термодпары, калиброванной с помощью ИК пирометра и низкокогерентного тандемного интерферометра [8]. Сжатые в плоскости роста слои формировались путем осаждения $Si_{1-x}Ge_x$ -слоев на подложку Si(001) либо на $Si_{1-y}Ge_y$ релаксированные буферные слои с меньшей долей Ge (т.е. $x > y$), а растянутые — с помощью осаждения на буферы $Si_{1-y}Ge_y$ с большей долей Ge ($x < y$). Скорость роста для всех образцов составляла 0.1 нм/с. Максимальное количество Sb, осаждаемой на поверхность, не превышало 0.1 монослоя (1 монослой $\approx 6.8 \cdot 10^{14}$ атомов/см²).

¶ E-mail: Inquisitor@ipm.sci-nnov.ru

Данное ограничение было применено для того, чтобы исключить влияние поверхностной концентрации примеси на эффект сегрегации, поскольку известно [3], что для значений поверхностной концентрации Sb, меньших 0.1 монослоя, сегрегация Sb не зависит от ее поверхностной концентрации. Для исследования полученных структур использовалась вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС) на установке TOFSIMS-5 с времяпролетным масс-анализатором. Послойное травление проводилось ионами Cs^+ с энергией 0.5–2 кэВ. Предел чувствительности ВИМС анализа к объемной концентрации Sb в исследуемых структурах составлял $(0.5-1) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (в зависимости от условий измерения).

Для количественного описания эффекта сегрегации удобно использовать коэффициент сегрегации, имеющий размерность длины и определяемый как отношение поверхностной концентрации примеси к ее объемной концентрации. Также часто используется безразмерный коэффициент сегрегации, получаемый нормировкой размерного коэффициента сегрегации на толщину монослоя (0.136 нм для системы Si/Ge). В настоящей работе используется безразмерный коэффициент сегрегации, обозначаемый далее r . Чем выше значение r , тем эффект сегрегации выражен сильнее. Так, например, при $r = 100$ лишь 1 из 100 атомов примеси, находящихся на поверхности, встраивается в объем структуры, а при $r = 1000$ — лишь 1 из 1000. Для определения коэффициента сегрегации Sb из профиля распределения концентрации примеси по глубине, получаемого из измерений ВИМС, использовалась методика, описанная в работе [3].

3. Результаты и их обсуждение

Первым типом исследуемых структур были SiGe-структуры, выращенные на подложках Si(001). В таком типе структур возможно получение SiGe-слоев с напряжениями только одного знака (сжатые в плоскости роста слои). Для структур со сжатыми SiGe-слоями были исследованы зависимости коэффициента сегрегации Sb от содержания Ge в таком слое и от температуры роста. Типичный профиль распределения концентрации Sb в подобных образцах, полученный методом ВИМС, показан на рис. 1. Из рис. 1 видно, что в той области структуры, где расположен SiGe-слой, наблюдается провал на профиле распределения примеси, т.е. в этой области сегрегация Sb усиливается, и соответственно встраивание атомов Sb в объем структуры ухудшается. Исследования серии структур вышеописанного типа, выращенных при постоянной температуре и отличающихся только составом SiGe-слоя, показали, что при относительно высоких температурах роста ($\sim 400^\circ\text{C}$) сегрегация Sb усиливается с ростом содержания Ge в сжатом SiGe-слое (рис. 2). (В данной работе для сравнения с кремнием использовалась зависимость r_{Si} от температуры роста, приведенная в [7]). Это может

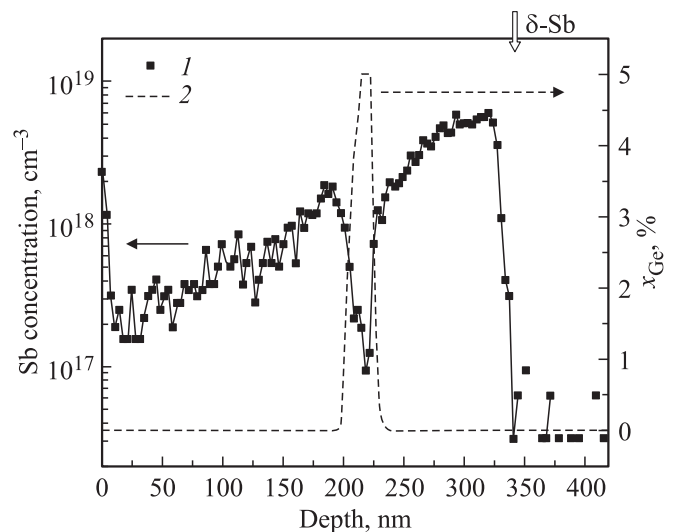


Рис. 1. Распределение Sb (1) и Ge (2) в структуре с напряженным слоем $\text{Si}_{0.95}\text{Ge}_{0.05}$, выращенным на подложке Si(001) при 400°C . Распределения получены с помощью ВИМС. Стрелкой вверх отмечено место осаждения 0.1 монослоя Sb. Глубина отсчитывается от поверхности структуры.

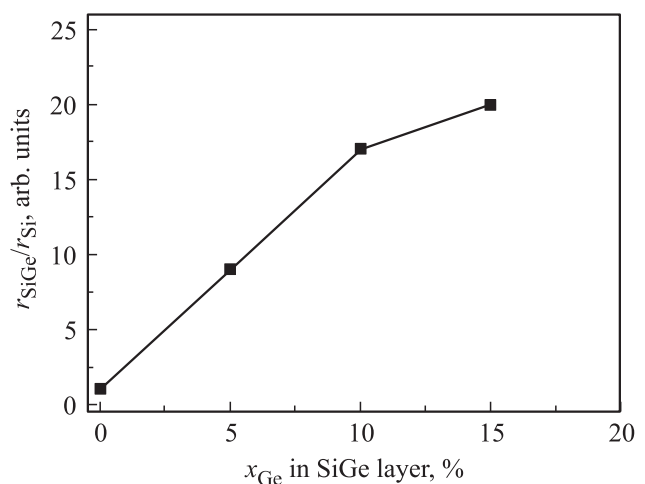


Рис. 2. Отношение коэффициента сегрегации Sb в сжатых слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ к коэффициенту сегрегации Sb в Si в зависимости от состава SiGe-слоя. Зависимость получена для температуры роста 400°C .

быть следствием суммарного действия двух факторов — изменения компонентного состава и упругих напряжений SiGe-слоя. Однако выяснить вклад каждого из этих факторов в отдельности на сегрегацию Sb в SiGe-структурах, выращенных на подложках Si(001), нельзя.

Для структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ со сжатыми слоями фиксированного состава, но выращенных при различных температурах, было установлено, что при уменьшении температуры роста отличие коэффициента сегрегации Sb в сжатых SiGe-слоях от его значения в Si уменьшается (рис. 3). При уменьшении температуры роста до значения порядка $T = 300^\circ\text{C}$ и ниже влияние компонентного

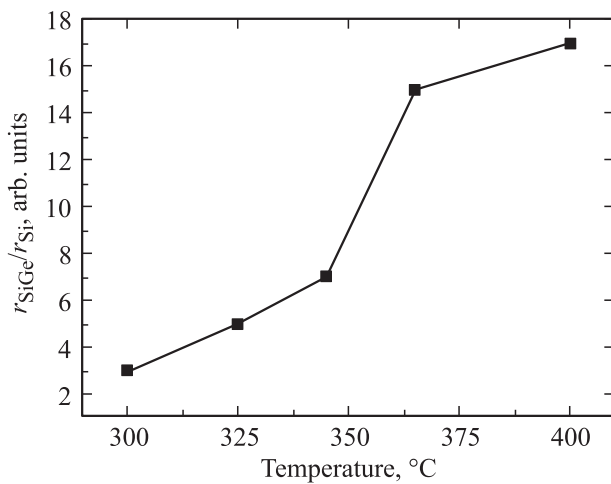


Рис. 3. Отношение коэффициента сегрегации Sb в сжатых слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ фиксированного состава к коэффициенту сегрегации в Si в зависимости от температуры роста. Содержание Ge в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -слое, $x = 10\%$.

состава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -слоя на сегрегацию Sb становится достаточно малым, и значение r_{SiGe} лишь незначительно превышает значение r_{Si} (рис. 3). Это объясняется тем, что при столь низких температурах затрудняются диффузионные процессы на поверхности, и различия между поверхностями Si и SiGe при этих температурах становятся несущественными, что ведет к тому, что значение r_{SiGe} становится близким к r_{Si} .

Как было указано выше, при использовании подложек Si(001) невозможно разделить влияние компонентного состава и упругих напряжений SiGe-слоя на сегрегацию Sb. В связи с этим были исследованы структуры второго типа, в которых в качестве подложки для роста $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ использовались релаксированные буферные слои $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ различного состава ($y = (11-36)\%$). Было экспериментально обнаружено, что в диапазоне температур роста $T < 350^\circ\text{C}$, в котором основным механизмом сегрегации является механизм „вскарabкивания“ атомов на ступени [5,6], сегрегация Sb в ненапряженных SiGe-слоях усиливается по сравнению с ненапряженным Si. Отсутствие упругих напряжений как в случае роста ненапряженных $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -слоев на релаксированных буферах SiGe, так и в случае роста Si-слоев на Si-подложках указывает на то, что усиление сегрегации Sb в этом случае вызвано компонентным составом растущего SiGe-слоя. Можно предположить, что компонентный состав матрицы влияет на величину энергетического барьера для процесса сегрегации Sb, что и приводит к зависимости коэффициента сегрегации от концентрации Ge в SiGe-слое.

Для выявления влияния упругих напряжений на сегрегацию Sb в SiGe-структурах было проведено сравнение коэффициентов сегрегации Sb в структурах с $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -слоями постоянного состава, выращенных при фиксированной температуре на различных подложках. Были использованы как Si-подложки, так и релакси-

рованные буферы $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ различного состава. Таким образом, были сформированы сжатые ($x > y$), релаксированные ($x = y$) и растянутые ($x < y$) $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -слои. Исследования распределения Sb в данной серии структур показали, что при температурах роста $T < 350^\circ\text{C}$ зависимость коэффициента сегрегации от упругих напряжений слаба, и сегрегация определяется составом SiGe-слоя. Для температур роста $T < 350^\circ\text{C}$ не было выявлено существенного уменьшения коэффициента сегрегации Sb и в растянутых Si-слоях, выращенных на релаксированных буферах SiGe, по сравнению с ненапряженными Si-слоями. Следовательно, при доминировании механизма сегрегации за счет „вскарabкивания“ атомов примеси на ступени ни величина, ни знак деформации отдельных слоев в гетероструктурах SiGe/Si не оказывают существенного влияния на сегрегацию Sb. Отметим, что в отличие от работы [2] при сверхнизких температурах роста ($T = 100-200^\circ\text{C}$) не наблюдалось какого-либо усиления зависимости сегрегации Sb от упругих напряжений. Возможно, очень высокие объемные концентрации примеси, полученные в работе [2] в SiGe-слоях, при используемых условиях роста объясняются не влиянием упругих напряжений, а подавлением при столь низких температурах процессов поверхностной диффузии, а значит, и подавлением сегрегации.

Проведенные исследования позволили установить, что сегрегация Sb в SiGe-гетероструктурах определяется взаимосвязанным влиянием условий роста и параметров структур. При этом влияние компонентного состава на сегрегацию примеси более значительно, чем упругих напряжений. Отметим также, что сегрегацией Ge при росте SiGe-слоев, которая могла бы изменить процессы, происходящие на поверхности, при используемых температурах ($T < 350^\circ\text{C}$) можно пренебречь [9]. Детальное выявление физических механизмов влияния параметров SiGe-слоев на сегрегацию Sb требует дальнейших исследований.

Для демонстрации возможностей селективного легирования SiGe-гетероструктур донорами методом МПЭ была выращена структура, дизайн которой является типичным при формировании SiGe-структур с двумерным электронным газом. Структура была выращена на релаксированном буфере $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с $x = 18\%$ и содержала SiGe ненапряженный слой, напряженный (растянутый) Si-канал и покровный, селективно-легированный сурьмой SiGe-слой. В подобных структурах для увеличения подвижности носителей заряда в напряженном Si-канале за счет уменьшения рассеяния носителей заряда на ионизованных атомах примеси легированная область SiGe-слоя, являющаяся источником электронов, должна быть пространственно отделена от самого канала. Иными словами, необходимо создать селективно-легированный SiGe-слой вблизи Si-канала. Применение методики селективного легирования, предложенной авторами ранее [7] с учетом полученных зависимостей сегрегации Sb от условий роста и параметров SiGe-слоев, позволяет решить эту задачу (рис. 4). Согласно результатам ВИМС

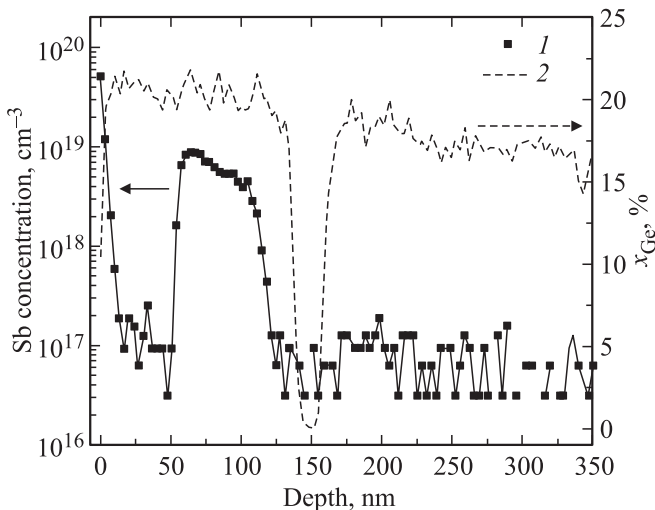


Рис. 4. Профили распределения Sb (1) и Ge (2) в селективно-легированной SiGe-структуре с напряженным Si-каналом, полученные с помощью ВИМС. Глубина отсчитывается от поверхности структуры.

анализа, в выращенной структуре удалось достигнуть градиента концентрации сурьмы на переднем фронте селективно-легированной области SiGe-структуры в ~ 5 нм/декада (рис. 4), что лишь в 2 раза хуже, чем для селективно-легированных областей в кремниевых структурах (2–3 нм/декада для Si-структур, полученных в работе [7]).

Таким образом, выяснено, что параметры SiGe-слоев и условия роста оказывают взаимосвязанное влияние на сегрегацию Sb, причем при относительно низких ($T < 350^\circ\text{C}$) температурах основным фактором является компонентный состав SiGe-слоя, а влияние упругих напряжений незначительно. Показано, что при формировании селективно-легированных SiGe-гетероструктур методом МПЭ необходимо учитывать взаимосвязанное влияние параметров SiGe-слоев и условий роста на сегрегацию примеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-02-00700-а), Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 27 и стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (№ СП-5485.2013.5). Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП ИФМ РАН.

Список литературы

- [1] H.-J. Gossmann, E.F. Shubert. *Crit. Rev. Sol. St. Mater. Sci.*, **18**, 1 (1993).
- [2] I. Berberzier, J.P. Ayoub, A. Ronda, M. Oehme, K. Lyutovich, E. Kasper, M. Di Marino, G. Bisognin, E. Napolitani, M. Berti. *J. Appl. Phys.*, **107**, 034 309 (2010).
- [3] K.D. Hobart, D.J. Godbey, M.E. Twigg, M. Fatemi, P.E. Thompson, D.S. Simons. *Surf. Sci.*, **334**, 29 (1995).
- [4] H. Jorke. *Surf. Sci.*, **193**, 569 (1988).

- [5] J.F. Nuzel, G. Abstreiter. *Phys. Rev. B*, **53**, 13 551 (1996).
- [6] C.B. Arnold, M.J. Aziz. *Phys. Rev. B*, **72**, 1 954 119 (2005).
- [7] D.V. Yurasov, M.N. Drozdov, A.V. Murel, M.V. Shaleev, N.D. Zakharov, A.V. Novikov. *J. Appl. Phys.*, **109**, 113 533 (2011).
- [8] П.В. Волков, А.В. Горюнов, А.Ю. Лукьянов, А.Д. Тертышник, А.В. Новиков, Д.В. Юрасов, Н.А. Байдакова, Н.Н. Михайлов, В.Г. Ремесник, В.Д. Кузьмин. *ФТП*, **46** (12), 1505 (2012).
- [9] S. Fukatsu, K. Fujita, H. Yaguchi, Y. Shiraki, R. Ito. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 2103 (1991).

Редактор Т.А. Полянская

Antimony segregation in strained SiGe structures grown by molecular beam epitaxy

M.N. Drozdov*, A.V. Novikov**+, D.V. Yurasov*

* Institute for Physics of Microstructures
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia
+ University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Dependences of antimony segregation in strained SiGe structures grown by molecular beam epitaxy on temperature, composition and elastic strains are investigated. It is shown that impacts of growth conditions and parameters of the structure are interrelated: degree of influence of composition and strain on Sb segregation depends on growth temperature. It is demonstrated that application of the selective doping technique of Si that was proposed by authors earlier taking into account obtained dependences of Sb segregation on growth conditions and parameters of SiGe layers allows formation of selectively doped SiGe structures.