

5. Прочностные свойства структур фоторезист ФП9120-кремний / С.А. Вабищевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. – 2014. – № 12. – С.69–73.
6. Микротвердость пленок полиимида и полиэтилентерефталата, облученных гамма-квантами ^{60}Co / Д.И. Бринкевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика – 2017. – № 12. – С.30–34.
7. Measuring mechanical properties of coatings: a methodology applied to nano-particle-filled sol-gel coating on glass / J. Malzbender [et al.] // Materials Science and Engineering R – 2002. – V.36 – P. 47–103.
8. Прочностные свойства структур фоторезист-кремний, γ -облученных и имплантированных ионами B^+ и P^+ / С.А. Вабищевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика – 2016. – № 12. – С.30–36.
9. EPR Spectroscopy of Diazoquinon-Novolac Resist Films Implanted with P^+ and B^+ Ions / D.I. Brinkevich [et al.] // High energy chemistry. – 2020. – V.54, № 2. – P.115–122.
10. Особенности определения механических характеристик тонких пленок методом наноиндентирования / А.Р. Шугуров, А.В. Панин, К.В. Оскомов // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, № 6. – С. 1007–1012.
11. Подавление радиационного упрочнения в кремнии, легированном германием / С.А. Вабищевич, Н.В. Вабищевич, Д.И. Бринкевич // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – № 4. – С.12–14.
12. Модификация пленок диазохинонволачного фоторезиста имплантацией ионов бора / Д.И. Бринкевич, В.С. Просолович, Ю.Н. Янковский // Журнал Белорусского государственного университета. – 2020. – № 2. – С.62–69.

СЕГРЕГАЦИЯ УГЛЕРОДА И ПРЕЦИПИТАЦИЯ SiC В УПРУГО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ СЛОЯХ Si/SiGe(SiSn)/Si

П. И. Гайдук

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: gaiduk@bsu.by*

Горячая имплантация ионов углерода в многослойные структуры с упруго-деформированными слоями сплавов SiGe и SiSn , встроенными в Si подложку, приводит к сегрегации примеси с последующим формированием углеродных фаз и карбида кремния. Обнаружено аномальное перераспределение имплантированной примеси вблизи напряженных слоев SiGe(SiSn)/Si , что сопровождается накоплением атомов углерода на стороне Si и истощением на стороне SiGe(SiSn) -слоев. Электронно-микроскопические исследования показали распределенные вдоль границ раздела Si/SiGe пластинчатые дефекты, которые связаны с углеродными фазами, а также фазами карбида кремния.

Ключевые слова: слои SiGe и SiSn ; имплантация ионов углерода; сегрегация; дефекты структуры.

CARBON SEGREGATION AND SiC PRECIPITATION IN STRAINED LAYERS OF Si/SiGe(SiSn)/Si

P. I. Gaiduk

Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus

Corresponding author: P. I. Gaiduk (gaiduk@bsu.by)

Hot ion implantation of carbon into strained multilayer structures of SiGe and SiSn alloys embedded in a Si substrate results in impurity segregation followed by SiC formation. An anomalous redistribution of the implanted impurity nearby strained SiGe(SiSn)/Si layers is accompanied by the accumulation of carbon atoms on the Si side and depletion on the SiGe (SiSn) side of layers. Dark-field images revealed plate-like defects and thin lamellas distributed along the Si/SiGe interface, which are associated with carbon-related phases and SiC.

Key words: SiGe and SiSn strained layers; carbon ion implantation; segregation; structural defects.

ВВЕДЕНИЕ

В современных кремниевых нано-технологиях углерод имеет важное значение, поскольку может использоваться не только в виде различных аллотропных форм, но и в атомарном виде для контроля диффузии основных примесных атомов в напряженных слоях Si и SiGe [1–3]. В частности, известна сильная роль углерода в замедлении диффузионного перераспределения бора [1, 3] в эпитаксиальных и ионно-имплантированных слоях. Углерод также перспективен для зонной инженерии полупроводников IV группы и гетероэпитаксиальных структур, поскольку введение даже небольших концентраций замещающего углерода эффективно деформирует кристаллическую решетку. Мы полагаем, что напряженные псевдоморфные слои Si/SiGe [4,5] являются перспективными для сегрегации атомов углерода и, соответственно, для формирования тонких ламелей SiC. Фазовое и структурное состояние этих преципитатов будет зависеть от конфигурации деформационных полей: в случае двумерных Si/SiGe/Si слоев следует ожидать пластинчатых выделений углеродных фаз или карбида кремния.

В настоящей работе для введения атомов углерода и точечных дефектов использовали высокотемпературную (ВТ) имплантацию ионов углерода в многослойные структуры Si/SiGe или Si/SiSn, что позволяло: (а) получать точечные дефекты в неравновесных концентрациях с их эволюцией в комплексы, пластинчатые дефекты и другие протяженные дефекты; и (б) пространственно разделять междоузлия и вакансии вблизи упруго-деформированных слоев SiGe и SiSn [4,5].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Слоистые структуры Si/SiSn/Si и Si/SiGe/Si выращивали методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках (100)-Si на установке VG Semicon V80. После десорбции с поверхности SiO₂ при 850 °C выращивали последовательно слои Si (100 нм), 30 нм Si_{0,98}Sn_{0,02} при 220 °C или 11 нм Si_{0,7}Ge_{0,3} при 450 °C, 300 нм Si при 450 °C. Альтернативно выращивали многослойную структуру Si/SiGe/Si в условиях, описанных в [5]. Затем образцы структур имплантировали 100–150 кэВ ионами угле-

рода до 2×10^{14} – 10^{16} см⁻² при комнатной (КТ) или высокой (ВТ = 525 °С) температуре. Часть образцов термически отжигали в среде N₂ при температурах 700–900 °С в течение 30 мин. Структурно-фазовые превращения исследовали с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в планарной и поперечной (Х-ПЭМ) геометриях на 200 кВ приборе Philips CM20. Профили распределения элементов по глубине исследовали методом вторичной ионно-масс-спектрометрии (SIMS) на приборе Ion-TOF с первичным пучком ионов Cs⁺ 6 кэВ при токе 40 нА. Разрешение по глубине и чувствительность к углероду лучше, чем 15 нм и 4×10^{17} см⁻³ соответственно. Шкалу глубин калибровали при сравнении с результатами измерений Х-ПЭМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены профили распределения углерода по глубине после имплантации в многослойные структуры Si/SiSn и Si/SiGe. Видно, что при НТ имплантации углерода происходит сильное перераспределение углерода и трансформация концентрационных профилей в локальных областях вокруг напряженных слоев SiGe и SiSn. Следует отметить сильное накопление углерода в областях границ раздела слоев Si, близко прилегающих к напряженным слоям SiGe, и истощение углерода в центральной части слоев Si и SiGe. Эффект перераспределения углерода в процессе ВТ-имплантации является сильным в поверхностном слое толщиной 0,5 мкм (рис. 1, с). Это указывает на то, что усиление перераспределения является феноменом, связанным с имплантацией, так как проникающие ионы замедляются из-за потери энергии в ядерных столкновениях и электронных возбуждений, которые преобладают в приповерхностной области. Как в случае КТ, так и ВТ-имплантированных структур дополнительный термический отжиг при температурах до 800 °С в течение 30 минут не приводит к значительным изменениям профиля концентрации, за исключением тонкого приповерхностного слоя, где исходная концентрация углерода была незначительной.

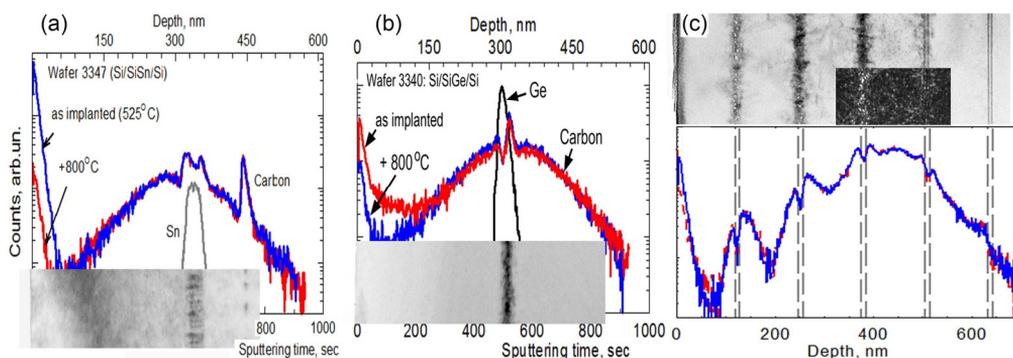


Рисунок 1. – SIMS профили распределения атомов С по глубине в многослойных структурах Si/SiSn (a) и Si/SiGe (b,c) после имплантации ионов углерода и термической обработки при 800 °С. На вставках приведены соответствующие светлопольные Х-ПЭМ изображения структуры. Положение границ раздела Si/SiGe обозначено на (с) вертикальными пунктирными линиями

На рисунке 2 (a) показано изображение ПЭМ в темном поле и дифракционная картина, полученная из многослойной структуры Si/SiGe после ВТ-имплантации (525 °С) углерода. Дифракционная картина получена из области максимальной концентрации углерода (слои 3–5 на рис. 1(c), глубина залегания ~ 300 нм). Установле-

но, что вместе с регулярными рефлексами от Si, дифракционная картина содержит некоторое количество экстра-пятен, имеющих вытянутую форму. Эти экстра-рефлексы обозначены стрелками на дифракционной картине. Положение дополнительных рефлексов соответствует межплоскостным расстояниям 0,32 и 0,28 нм, которые не связаны с кремнием, однако, сопоставляются с $d_{111} \sim 0.321$ нм и $d_{200} \sim 0.277$ нм в кубической углеродной фазе высокого давления [6] или выделений карбида кремния. Вытянутая форма этих дополнительных рефлексов указывает на двумерную морфологию структурных особенностей. Хорошо известно, что тяжи интенсивности (вытянутость рефлексов) на дифракционных картинах обычно обусловлены очень тонкими дефектами или выделениями другой фазы, такими как дефекты упаковки, тонкие упорядоченные домены, пластинчатые дефекты, ламели и тонкие выделения, которые когерентны с матрицей в кристалле [7]. Таким образом, дифракционная картина свидетельствует о формировании тонких ламелей, включающих в свой состав атомы углерода или выделения карбида кремния.

Темнопольные X-ПЭМ изображения в поперечном сечении, приведенные на рисунке 2 (z, d) получены в дифракционных экстра-рефлексах (200) углерода и демонстрируют вид пластинчатых дефектов (длинных тонких ламелей), распределенных вдоль границ раздела Si/SiGe (длинные тонкие яркие полосы на темном фоне). Темнопольное планарное изображение на рисунке 2 (a) получено в перекрывающихся (111) рефлексах Si и углерода и показывает, как преципитаты углерода, так и собственные вторичные дефекты слоев Si. Изображение X-ПЭМ в темном поле на рисунке 2 (б) получено от области между слоями 3 и 4, с использованием дифракционного рефлекса $d \sim 0,28$ нм, от углеродных фаз [6]. На изображении можно выделить яркие пятна, соответствующие частицам двух типов. Частицы первого типа имеют вид трехмерных (сферических) преципитатов малого размера ($\sim 2-3$ нм), однородны по размеру и расположены в центральной части слоя Si на глубине около 450 нм. Эта глубина соответствует среднему проецированному пробегу имплантированных ионов и, соответственно, максимальной концентрации атомов углерода. В качестве примера в левом нижнем углу рисунка 2 (б) приведено увеличенное изображение таких частиц. На изображении видны полосы Муара, указывающие на несоответствие кристаллических решеток частицы и матрицы. Анализ изображений таких частиц позволяет отнести их к карбидной (SiC) фазе. Яркой особенностью контраста частиц второго типа являются их двумерность (плоская форма) и расположение вдоль границы раздела Si/SiGe.

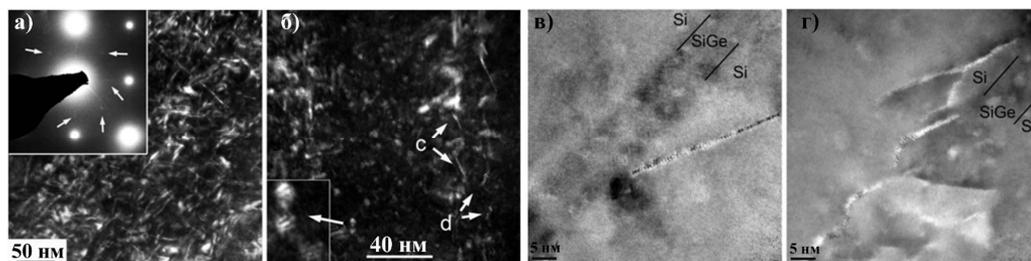


Рисунок 2. – ПЭМ-изображения пластинчатых выделений в многослойной структуре Si/SiGe после VT-имплантации ионов углерода. (a, б) – дифракция и темнопольные ПЭМ изображения; (в, z) – светлопольные X-ПЭМ изображения высокого разрешения слоев Si/SiGe на глубине ~ 300 нм

Некоторые из этих плоских преципитатов обозначены стрелками на рисунке 2 (б) как «с» и «д». Увеличенные светлопольные ПЭМ изображения этих дефектов в режиме высокого разрешения решетки приведены соответственно на рисунке 2 (в) и (г). Изображения демонстрируют сложную внутреннюю структуру, типичную для преципитатов (выделений) второй фазы. Кроме того, дефекты изменяют свой контраст, когда они удаляются от слоя SiGe. Такое поведение ПЭМ-контраста можно объяснить преципитацией углерода или карбида кремния в ядрах протяженных вторичных дефектов структуры [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в упруго-деформированных структурах Si/SiGe(SiSn)/Si, имплантированных ионами углерода, происходит сегрегация углерода с последующим формированием углеродных фаз. В частности, методами SIMS обнаружено аномальное перераспределение имплантированных атомов углерода вблизи напряженных слоев SiGe(SiSn)/Si, что приводит к их накоплению на стороне Si и истощению на стороне SiGe (SiSn) структуры. Темнопольные ПЭМ-изображения демонстрируют пластинчатые дефекты и длинные тонкие ламели, распределенные вдоль границ раздела Si/SiGe(SiSn), которые связаны с фазами углерода, а также сверхтонкими пластинками карбида кремния.

Автор признателен А.Н.Ларсену за полезные дискуссии и Дж. Л. Хансену за выращивание Si/SiGe(SiSn) структур методом МЛЭ. Исследования выполнены в рамках проекта 3.2.04 ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», номер госрегистрации 20190644.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Rucker, H. Nonequilibrium point defects and dopant diffusion in carbon-rich silicon / H. Rucker, B. Heinemann, R. Kurps // *Phys. Rev. B.* – 2001. - V. 64. – P. 073202.
2. Osten, H.J. Dopant diffusion control by adding carbon into Si and SiGe: principles and device application / H.J. Osten, D. Knoll, H. Rucker // *Materials Science and Engineering B.* – 2001. - V. 87. – P. 262–270.
3. Pawlak, B.J. Effect of amorphization and carbon co-doping on activation and diffusion of boron in silicon / B.J. Pawlak, T. Janssens, B. Brijs, W. Vandervorst, E.J.H. Collart [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – V. 89. - № 6. – P. 062110.
4. Gaiduk, P.I. Temperature effect on defect evolution in 800 keV Ge-implanted Si/SiGe multi-layered structure / P.I. Gaiduk, J L.Hansen, A.N Larsen, E.A. Steinman // *Phys. Rev. B.* – 2003. - V. 340. – P. 813-817.
5. Gaiduk, P.I. Strain-driven defect evolution in Sn⁺ implanted Si/SiGe multilayer structure / P.I.Gaiduk, A.Nylandsted Larsen, W.Wesch // *Nucl.Instr. and Meth.in Phys. Res. B.* – 2009. - V. 267. - № 7. – P. 1239.
6. Aust, R.B., Drickamer, H.G Carbon: A new crystalline phase / R.B.Aust, H.G.Drickamer // *Science.* – 1965. – V. 140. - № 3568. – P. 817–819.
7. Kamins, T.I. Hall Mobility in Chemically Deposited Polycrystalline Silicon / T.I. Kamins // *J. of Appl. Phys.* – 1971. – V. 42. – P. 4357–4365.
8. Хирш, П. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон, Д. Пэшли, М. Уэлан. - Москва: Мир, 1968. –575 с.