

Литература

1. Брискин Б. С., Алиев И. М., Полонский А. К. и др. Экспериментальное и клиническое обоснование эффективности чрезкожного облучения крови // Матер. Междунар. конфер. «Новые напр. лаз. мед.»
2. Иванов А. П. Оптика рассеивающих сред Мн.: Наука и техника, 1969
3. Кугейко М. М. Лазерная диагностика и спектроскопия Минск, БГУ, 2002
4. Демтрейдер В. Лазерная спектроскопия: основные принципы и техника эксперимента. М.: Наука, 1985
5. Лазерная аналитическая спектроскопия / Под ред. В. С. Летохова. М.: Науку, 1987.
6. Малышев В. И. Введение в экспериментальную спектроскопию. М.: Наука, 1979.

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЛЕГИРОВАННЫХ МЫШЬЯКОМ СЛОЯХ SiGe СПЛАВОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ОТЖИГЕ

К. В. Яцко, Д. В. Колтович

Поиск альтернативных материалов, совместимых с Si-технологией, исследование их свойств, а также разработка приборных структур на их основе, являются приоритетными направлениями материаловедения и полупроводниковой электроники. В частности, тенденции развития микроэлектроники предполагают широкое использование метастабильных структур – высоколегированных и пересыщенных слоёв SiGe сплавов. Высоколегированные слои имеют важное значение для создания истоковых областей в МОП технологии и эмиттеров – в биполярной. В связи с этим, система SiGe + As является перспективной для формирования приборов микроэлектроники.

Известно, что в кристаллах чистых кремния, легированных мышьяком до высокой концентрации, атомы As одновременно могут существовать в трех различных состояниях [1]:

- часть атомов As в концентрации n_e , не превышающей $\sim 3,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, являются электрически активными;
- атомы As в концентрации выше $C_{\text{sat}} \sim 3,2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ участвуют в образовании выделений фазы SiAs, где величина C_{sat} фактически соответствует пределу равновесной растворимости As в Si;
- большая фракция атомов As в концентрации $N_{\text{as}} = C_{\text{sat}} - n_e$, является электрически нейтральной, однако не образует выделений второй фазы, причем предполагается, что атомы As входят в состав подвижных примесно-дефектных комплексов. Атомная структура таких комплексов до настоящего времени является предметом активных дискуссий.

Недавно было показано, что в сплавах SiGe, эпитаксиально-выращенных на Si подложках, имеют место аналогичные закономерности [2].

В нашей работе были исследованы структурно-фазовые превращения в сильнолегированных мышьяком слоях $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ сплавов, при равновесном термическом отжиге.

ПРИГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

Релаксированные эпитаксиальные слои сплава $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ толщиной 2 мкм были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках (001)-Si p-типа. При осаждении слоёв проводилась имплантация ионов мышьяка с энергией 1 кэВ, в результате на глубине 60 нм был сформирован слой $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5} + \text{As}$, с концентрацией мышьяка $N_{\text{As}} \sim 2 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Поскольку МЛЭ рост осуществлялся при повышенной температуре $\sim 550^\circ\text{C}$, радиационные дефекты структуры отжигались практически полностью уже во время имплантации. Вместе с тем, некоторое количество точечных дефектов, комплексов или протяженных дефектных образований может быть генерировано при таком методе легирования. После этого, образцы данной структуры отжигались в атмосфере кислорода в широком диапазоне температур в течение 2-60 мин. Химический состав образцов исследовался с помощью резерфордовского обратного рассеяния каналированных ионов (РОРКИ) с использованием ионов He^+ с энергией 1.5 МэВ. Структурно-фазовый состав был исследован методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в режиме планарной геометрии. Для этих целей использовался просвечивающий электронный микроскоп ЭМ-125 с ускоряющим напряжением 100 кВ. Образцы для ПЭМ утонялись методом химико-динамического травления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из *рис. 1* видно, что отжиг при 720°C приводит к появлению на спектре РОРКИ пиков обратно рассеянных ионов He^+ от O_2 (область каналов 120-130), Si (область каналов 200-210), а также увеличению выхода от тяжелых атомов - Ge, As (область каналов 290-310). Было обнаружено, что при низких температурах ($200^\circ\text{C} - 750^\circ\text{C}$) окисление SiGe сплавов, с высокой концентрацией Ge ($\geq 50\%$), приводит к образованию на поверхности смешанного оксида SiO_2 и GeO_2 , что хорошо согласуется с ранее полученными результатами [3]. Известно, что процесс деактивации мышьяка связан с формированием сложных точечных дефектов. При образовании нейтрального комплекса As_2V , происходит смещение атомов As из узлов решётки на величину $\sim 0.015 \text{ нм}$ [4], что также влияет на увеличение пика выхода обратно рассеянных ионов от мышьяка.

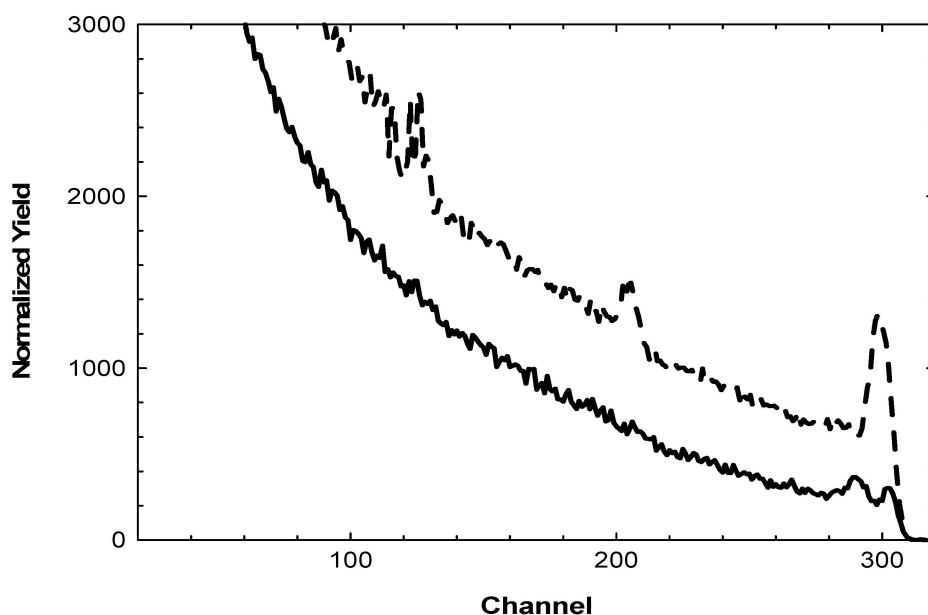


Рис. 1. Спектры РОР в каналированном режиме :
— исходная структура, - - после отжига при 720°C 10 минут

Также из спектров РОРКИ было установлено, что термическое окисление сплавов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в атмосфере кислорода при температуре $\sim 900^\circ\text{C}$ и выше, приводит к окислению Si до SiO_2 , в результате Ge оттесняется фронтом окисла, смещаясь в глубь образца, вслед за движущейся границей раздела SiGe/SiO_2 . Это связано с: существенными различиями между теплотами образования SiO_2 и GeO_2 (образование SiO_2 значительно выгоднее) и малой растворимостью Ge в SiO_2 [3].

Структурно-фазовые превращения в метастабильных слоях SiGeAs при дестабилизирующем термическом отжиге исследовались методом просвечивающей электронной микроскопии.

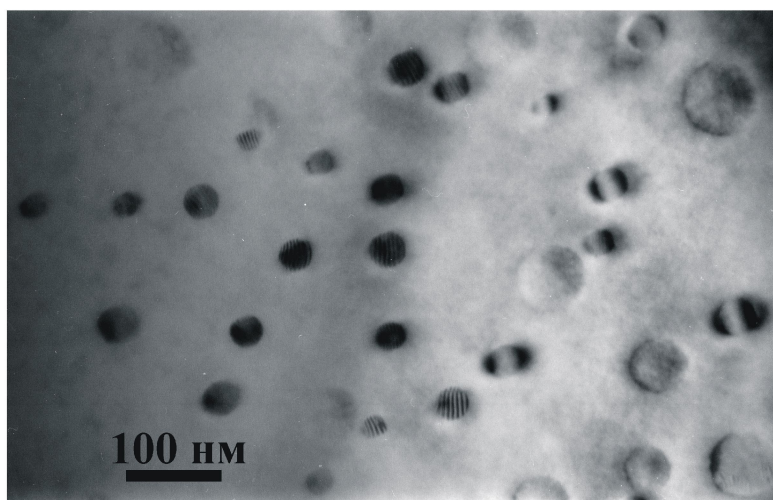


Рис. 2. Светлопольная ПЭМ микрофотография от образца после отжига при 915°C в течение 20 минут

Был установлен пороговый характер формирования наноразмерных преципитатов в матрице SiGe . Образование выделений вторичной фазы происходит при превышении граничной температуры (915°C) и сопровождается отжигом дефектов дислокационного типа

(рис. 2). Сравнительный анализ контраста микрофотографии на рис. 2 предоставляет убедительное свидетельство определяющей роли степени пересыщения на структурно-фазовый состав образцов. Так, микрофотография содержит темные пятна на сером фоне. Более темный абсорбционный ПЭМ – контраст пятен по сравнению с фоном указывает на то, что соответствующие им структурные образования являются преципитатами, включающими в свой состав большее количество тяжелых атомов, чем окружающая матрица. По результатам электронной дифракции было установлено в состав преципитатов входят атомы Ge и As. Это согласуется с результатами расчёта композиционного состава методом рентгеновского микроанализа в [2]. При длительных временах термического окисления при температуре выше граничной выделения фазы GeAs обнаружено не было, что связано с диффузионным перераспределением мышьяка в образце.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе были исследованы структурные превращения и поведение примеси в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ сплавах после высокодозной *in-situ* имплантации ионов As^+ и последующего дестабилизирующего отжига в различных режимах. Обнаружено образование смешанного оксида $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ при окислении сплава $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ в области температур 500°C – 750°C , отжиг при температурах выше 900°C приводит к сегрегации Ge. Установлена пороговая зависимость выделения фазы GeAs, определена граничная температура 915°C , при которой образование GeAs преципитатов сопровождается отжигом дефектов дислокационного типа.

Литература

1. *Nobili D. Solmi S. Parisini A. et.al. // Phys. Rev.*, 1994. – Vol.B 49. – N4, P. 2477-2483.
2. *Гайдук П. И.* Неравновесные процессы формирования материалов и структур твердотельной электроники: Дис... д-ра физ.-мат. наук. – Минск, 2004.
3. *Rabie M. A. Haddara Y. M. Carette J.* Kinetic model for the oxidation of silicon germanium alloys // *J. Appl. Phys.*, 2005, Vol. 98 (7).
4. *Nobili D.* Carabelas Precipitation as the phenomenon responsible for the electrically inactive arsenic in silicon // *J. Electrochem. Soc.*, 1983, N4, P922-928.

ЭФФЕКТ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Т. А. Бракоренко

Одной из актуальных задач современного материаловедения является создание принципиально новых материалов, способных проявлять про-