ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗ В СТРУКТУРАХ КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ In^+ И Sb^+

И.Е. Тысченко[1)], Ж. Чжан[1), 2)], А.К. Гутаковский[1)],
В.И. Вдовин[1)], В.А. Володин[1), 2)], В.П. Попов[1)]
[1)]*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова,*
пр. Лаврентьева 13, Новосибирск, Россия,
tys@isp.nsc.ru; *cherkova@isp.nsc.ru*; *popov@isp.nsc.ru*
[2)]*Новосибирский государственный университет,*
ул. Пирогова 2, Новосибирск, Россия, sangexiaoshagua@gmail.com

Изучено формирование новых фаз вблизи границ сращивания Si/SiO_2 структуры кремний-на-изоляторе со слоями Si и SiO_2, имплантированными соответственно ионами Sb^+ и In^+, в процессе высокотемпературного отжига при T = 1100 ºC длительностью 1-300 мин. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света обнаружено, что в имплантированных структурах на начальных стадиях отжига наблюдается рассеяние на частоте оптических фононов в Sb, In_2O_3 и InSb. Положения TO и LO мод в InSb смещены в высокочастотную область относительно их значений в объемном монокристалле. Увеличение длительности отжига сопровождается доминированием в спектрах рассеяния на частоте TO и LO фононов в InSb и низкочастотному смещению оптических мод к значениям в монокристалле InSb. Сделаны оценки деформаций In-Sb связей в синтезированной матрице InSb как функции длительности отжига. Установлено, что по мере роста длительности отжига деформации в синтезированном InSb уменьшаются до нуля. Полученные результаты объясняются особенностями эволюции нанокристаллов InSb на границе Si/SiO_2 в зависимости от времени отжига, установленными методом высокоразрешающей электронной микроскопии.

Ключевые слова: ионная имплантация; КНИ; InSb; нанокристаллы; Si/SiO_2; граница раздела.

PHASE FORMATION IN THE In^+ AND Sb^+ ION-IMPLANTED SILICON-ON-INSULATOR STRUCTURES

I.E. Tyschenko[1)], R. Zhang [1), 2)], A.K. Gutakovskii[1)], V.I. Vdovin[1)],
V.A. Volodin[1), 2)], V.P. Popov[1)]
[1)]*A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, 13 Lavrentyev Ave., Novosibirsk, Russia,*
tys@isp.nsc.ru, cherkova@isp.nsc.ru, popov@isp.nsc.ru
[2)]*Novosibirsk State University,*
2 Pirogov Str., Novosibirsk, Russia, sangexiaoshagua@gmail.com

The formation of new phases near the Si/SiO_2 bonding interface of a silicon-on-insulator structure with the Sb^+ and In^+ ion-implanted Si and SiO_2 layers, respectively, was investigated during the high-temperature annealing at T = 1100 ºC for 1-300 minutes. A thermally grown SiO_2 layer was implanted with In^+ ions at the energy of 100 keV to the dose of 8×10^{15} cm^{-2}. Sb^+ ions at the energy of 100 keV to the dose of 8×10^{15} cm^{-2} were implanted in the other Si wafer. Then, the implanted wafers were connected by the implanted surfaces, bonded and the 640 nm thick Sb^+ ion-implanted silicon layer was transferred to the In^+ ion implanted SiO_2. Raman spectroscopy and high-resolution electron microscopy were used to the investigation of the prepared samples. The Raman peaks corresponding to the TO and LO phonon modes in the monocrystalline Sb lattice, In_2O_3 matrix and monocrystalline InSb matrix were obtained after the annealing at 1100 ºC for 1-3 minutes. At that, the optical phonon frequencies were blue-shifted compared to their values in the bulk monocrystalline InSb matrix. As the annealing time increased, the Raman scattering at the optical phonon frequencies in the InSb dominated, as well as the TO and LO mode positions red-shifted. From the LO and TO peak frequency, the In-Sb bond deformation as a function of the annealing time was estimated. It was obtained, as the annealing duration increases, deformations in the synthesized InSb matrix decrease to zero. The obtained results are explained by the features of the InSb nanocrystal evolution at the Si/SiO_2 interface depending on the annealing time. These features were established by high-resolution electron microscopy.

Keywords: ion implantation; SOI; InSb; nanocrystals; Si/SiO_2; interface.

Введение

Создание гибридных интегральных схем, подразумевающее объединение различных функциональных элементов на одной кремниевой подложке, рассматривается как наиболее возможный вариант для увеличения быстродействия интегральных схем в рамках имеющейся кремниевой технологии. Реализация таких схем требует создания новых многофункциональных материалов, обладающих соответствующими электронными, фотонными и другими свойствами. В качестве таких материалов предлагаются низкоразмерные кристаллы соединений A_3B_5, внедренные в структуры на основе кремния. Ионно-лучевой синтез нанокристаллов соединений A_3B_5 в гетероструктурах на основе кремния рассматривается как перспективный метод, хорошо совместимый с имеющейся кремниевой технологией и позволяющий устранить проблемы, обусловленные большим рассогласованием решеток Si и большинства материалов A_3B_5.

В данной работе мы исследуем эволюцию свойств нанокристаллов InSb в процессе ионно-лучевого синтеза на границе раздела Si/SiO_2 структуры кремний-на-изоляторе (КНИ).

Методика эксперимента

Исходная и термически окисленная пластины кремния были имплантированы соответственно ионами Sb^+ и In^+ с энергией 100 кэВ дозой 8×10^{15} см$^{-2}$. Затем в первую пластину Si были имплантированы ионы H_2^+ с энергией 130 кэВ дозой 2.5×10^{16} см$^{-2}$. После этого по созданным имплантацией водорода внутренним ослабленным плоскостям осуществлялся перенос слоя кремния толщиной около 640 нм, имплантированного ионами Sb^+, на окисленную пластину Si, имплантированную ионами In^+. В результате была создана структура КНИ, в которой по обе стороны от границы сращивания Si/SiO_2 на расстоянии около 60 нм находились области с концентрацией атомов *Sb* и *In* ~4 ат.%. Последующий отжиг проводился в потоке паров N_2 при температуре 1100ºС в течение 1-300 минут. После отжига толщина верхнего слоя кремния доводилась до нескольких десятков нанометров путем химического травления в водном растворе аммиака при температуре 40 ºС. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) исследовались при комнатной температуре при возбуждении излучением Ar лазера с длиной волны 514.5 нм. Структурные свойства исследовались методом высокоразрешающей электронной микроскопии на поперечном срезе (ВРЭМ).

Результаты и их обсуждение

На рис. 1а представлены спектры КРС имплантированных КНИ структур после отжига при T = 1100 ºС в течение 1 – 300 мин. Из рисунка видно, что в спектрах образцов, подвергшихся коротковременному отжигу в течение 1-3 минут, доминируют пики рассеяния на частотах 134 см$^{-1}$ и 152

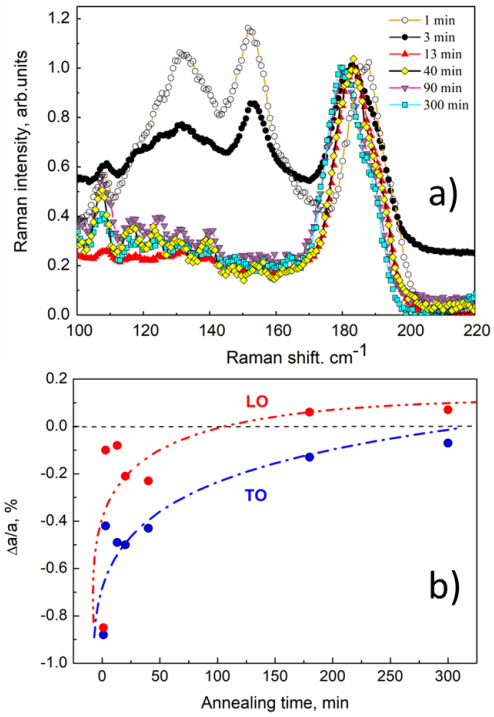

Рис. 1. (a) Спектры КРС имплантированных КНИ структур после отжига при T = 1100 ºС в течение 1 – 300 мин. (b) Деформации решетки в нанокристаллах InSb, соответствующие смещению линий TO и LO фононов в зависимости от температуры отжига при T = 1100 ºС

см$^{-1}$, которые соответствуют оптическим фононам в матрицах In_2O_3 и кристаллической Sb соответственно. Интенсивный широкий пик также наблюдается на частоте около 186 см$^{-1}$. В низкочастотной области пика на частоте около 190 см$^{-1}$ наблюдается ассиметричное плечо рассеяния. Увеличение времени отжига сопровождается исчезновением пиков рассеяния на оптических фононах в In_2O_3 и Sb, а также низкочастотным сдвигом мод оптических фононов в InSb. Разложение пиков КРС на составляющие TO и LO позволили оценить по положению соответствующих частот деформации In-Sb связей в нанокристаллах InSb при разных длительностях отжига (рис. 1b). Из Рис. 1b видно, что на начальных стадиях формирования In-Sb связи в нанокристаллах InSb сжаты, причем в поперечном направлении эти сжатия в ~2 раза больше, чем в продольном. По мере роста нанокристаллов, деформации исчезают.

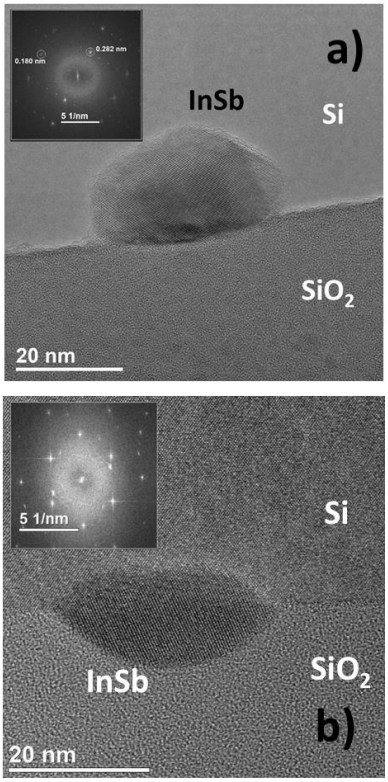

Рис. 2. ВРЭМ изображения нанокристалла InSb на границе раздела Si/SiO_2, формирующегося после отжига при температуре T = 1100 ºC в течение (a) 1 минуты и (b) 90 минут

Полученные методом КРС данные коррелируют с результатами ВРЭМ. На рис. 2 представлены ВРЭМ изображения нанокристаллов InSb на границе раздела Si/SiO_2, формирующихся после отжига при температуре T = 1100 ºC в течение 1 минуты и 90 минут. Из рисунка видно, что локализация нанокристалла в зависимости от длительности отжига существенно различается. При коротких временах отжига нанокристалл InSb практически полностью находится в матрице Si. При этом он имеет четкую огранку. Решетка нанокристалла ориентирована решеткой кремния. Это может быть причиной деформаций, наблюдаемых в спектрах КРС. После длительного отжига нанокристалл растет от границы раздела Si/SiO_2 в пленку SiO_2, где имеет каплевидную форму.

Заключение

Формирование нанокристаллов InSb вблизи границы раздела Si/SiO_2 происходило в процессе высокотемпературного отжига КНИ структур со слоями Si и SiO_2, имплантированными соответственно ионами Sb^+и In^+. Установлено, что на начальных стадиях отжига при T = 1100 ºC происходит синтез кристаллической Sb в кремнии, In_2O_3 в SiO_2 и рост нанокристаллов InSb в кремнии вблизи границы раздела Si/SiO_2. Решетка нанокристаллов InSb деформирована. По мере увеличения длительности отжига рост нанокристаллов InSb происходит преимущественно от границы раздела в пленку SiO_2. Доля фаз Sb и In_2O_3 уменьшается. Из смещения частоты оптических фононов оценены деформации в матрице InSb как функция времени отжига при T = 1100 ºC. Обнаружено, что величина деформаций, оцененных их продольной и поперечной мод оптических фононов отличается в 2 раза и уменьшается практически до нуля по мере роста времени отжига от 1 до 300 минут. Полученные результаты указывают на то, что деформации в нанокристаллах на начальной стадии роста не являются гидростатическими.