

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКРИСТАЛЛОВ InSb В ПРОЦЕССЕ ИОННО-ЛУЧЕВОГО СИНТЕЗА ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА Si/SiO₂

И.Е. Тыщенко¹⁾, А.К. Гутаковский¹⁾, В.А. Володин¹⁾, Р.И. Баталов²⁾, П. Швец³⁾,
А. Гойхман³⁾, В. Вдовин¹⁾, В. Попов¹⁾

¹⁾Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова,
пр. Ак. Лаврентьева 13, Новосибирск 630090, Россия,
tys@isp.nsc.ru, gut@isp.nsc.ru, volodin@isp.nsc.ru,
vivdovin@isp.nsc.ru, popov@isp.nsc.ru

²⁾Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского,
ул. Сибирский тракт 10/7, Казань 420029, Россия, batalov@kfti.knc.ru

³⁾Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
ул. А. Невского 14, Калининград 236041, Россия,
petrshvetsv@gmail.com, AGoikhman@kantiana.ru

Эволюция структурных и оптических свойств нанокристаллов InSb, формирующихся вблизи границы раздела Si/SiO₂ структуры кремний-на-изоляторе в процессе ионно-лучевого синтеза, изучена в зависимости от температуры и времени отжига. Установлено, что зарождение нанокристалла InSb происходит в матрице кремния за счет диффузии из захороненного слоя SiO₂ имплантированных атомов In в пленку кремния к преципитатам Sb, формирующимся в процессе сегрегации из пересыщенного раствора. Несмотря на то, что рас-согласование решеток Si и InSb составляет 19%, в условиях ионно-лучевого синтеза достигаются условия, обеспечивающие совпадающие направления Si[110]/InSb[001] и Si[110]/InSb[-114] для межплоскостного согласования решеток. По мере роста нанокристалл InSb «выходит» из матрицы кремния на границу раздела Si/SiO₂ с последующим проращиванием в SiO₂. Край оптического поглощения в нанокристаллах сдвинут в область высоких энергий, по сравнению с объемным монокристаллом InSb, и составил 0.31 – 0.43 эВ, что свидетельствует о квантово-размерном эффекте. В спектрах фотолюминесценции наблюдалась полоса с максимумом ~430 нм, спектр возбуждения которой соответствовал переходам между уровнями кислородных вакансий в SiO₂.

Ключевые слова: ионная имплантация; кремний-на-изоляторе; нанокристаллы; InSb; фотолюминесценция; эпитаксиальный рост.

EVOLUTION OF THE STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF InSb NANOCRYSTALS DURING THE ION-BEAM SYNTHESIS AT THE Si/SiO₂ INTERFACE

Ida Tyschenko¹⁾, Anton Gutakovskii¹⁾, Vladimir Volodin¹⁾, Rafael Batalov²⁾,
Petr Shvets³⁾, Aleksandr Goikhman³⁾, Vladimir Vdovin¹⁾, Vladimir Popov¹⁾

¹⁾A.V. Rzhzanov Institute of Semiconductor Physics, Russian Academy of Sciences,
Siberian Branch, 13 Lavrentyev Ave., 630090 Novosibirsk, Russia,
tys@isp.nsc.ru, gut@isp.nsc.ru, volodin@isp.nsc.ru,
vivdovin@isp.nsc.ru, popov@isp.nsc.ru

²⁾Kazan E.K. Zavoisky Physical-Technical Institute, Federal Research Center Kazan Scientific
Center of Russian Academy of Sciences, 10/7 Sibirsky tract, 420029 Kazan, Russia,
batalov@kfti.knc.ru

³⁾Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevsky str., Kaliningrad, 236041, Russia,
petrshvetsv@gmail.com, AGoikhman@kantiana.ru

The InSb nanocrystal formation, as a function of the annealing time at a temperature of 900-1100 °C, was studied in the silicon-on-insulator structure containing the Sb⁺- and In⁺ ion-implanted Si and SiO₂ regions at the Si/SiO₂ interface. RBS, STEM, HRTEM, EDX, Raman, emission (PL) and excitation (PLE) photoluminescence and FTIR techniques were employed to analyze the In and Sb atom profiles, the structural properties and the elemental

composition of the nanoparticles, as well as the optical phonons and the optical bandgap of InSb nanocrystals. As the annealing temperature achieved 1000 °C, the *In* atom diffusion from the SiO₂ layer to *Sb* precipitates, formed in the top Si layer during the *Sb* atom segregation to the Si/SiO₂ interface, was established. Cooling the InSb alloy with its subsequent crystallization results in the growth of the hydrostatically stressed InSb nanocrystals in the Si matrix at the Si/SiO₂ interface. Despite the fact that the mismatch of the Si and InSb lattices is 19%, coincident Si[110]/InSb[001] and Si[110]/InSb[-114] directions were established for the interplane matching of InSb and Si lattices. The effect of the nanocrystal structure on the optical phonon frequency was investigated. From the FTIR analysis, the optical bandgap 0.31-0.43 eV was obtained for the InSb nanocrystals. After the annealing at 1100 °C, the visible PL band peaked at ~430 nm was observed at RT. Its intensity increased, as the annealing time grew. The PL origin was associated with the oxygen deficiency centers formed at the InSb/SiO₂ interface.

Keywords: ion implantation; silicon-on-insulator; nanocrystals; InSb; photoluminescence; epitaxial growth.

Введение

Дальнейшее повышение скорости работы микросхем за счет уменьшения размера активных областей интегральных схем (ИС) достигло своего физического предела. Один из наиболее вероятных путей решения проблемы — создание гибридных ИС, состоящих из различных функциональных элементов и позволяющих обеспечить передачу сигналов внутри ИС за счет оптической связи. В качестве многофункционального материала, наиболее подходящего для реализации таких элементов, предложены низкоразмерные кристаллы A_3B_5 , среди которых InSb обладает наиболее примечательными свойствами.

Формирование нанокристаллов InSb в КНИ структурах является очень сложной задачей из-за большого (19 %) несоответствия постоянных кристаллической решетки Si и InSb. Разработка новых методов создания гетероструктур на основе кремния, содержащих нанокристаллы InSb, остается важной задачей.

В данной работе мы представляем результаты исследований структурных и оптических свойств нанокристаллов InSb, ионно-синтезированных на границе раздела Si/SiO₂ КНИ структур в зависимости от температуры и времени отжига.

Методика эксперимента

Были созданы КНИ структуры, в которых области Si и SiO₂ по обе стороны от границы раздела Si/SiO₂ имплантированы ионами Sb^+ и In^+ соответственно. Детали

эксперимента описаны в работе [1]. Энергия ионов In^+ и Sb^+ составляла 100 кэВ ($D = 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$). Отжиг сформированных КНИ структур проводился при температуре 900-1100 °C длительностью от 1 до 300 минут в потоке паров N₂.

Распределение имплантированных атомов изучалось с помощью резерфордовского обратного рассеяния (RBS). Структурные свойства образцов изучались с помощью электронной микроскопии в сканирующем (STEM) и высокоразрешающем просвечивающем (HRTEM) режимах на поперечных срезах. Оптические свойства структур изучались методами комбинационного рассеяния света (Raman), фотолюминесценции (PL) и фотолюминесценции возбуждения (PLE) при комнатной температуре в видимом спектральном диапазоне и спектроскопии инфракрасного поглощения (FTIR).

Результаты и их обсуждение

В спектрах комбинационного рассеяния света формирование полос, обусловленных рассеянием на оптических фононах в матрице InSb наблюдалось, начиная с температуры отжига 1000 °C. При более низкой температуре (900 °) в спектрах присутствовали лишь полосы, связанные с рассеянием на оптических фононах в кристаллической Sb и In₂O₃. Формирование наблюдаемых фаз обусловлено особенностями диффузии имплантированных атомов Sb^+ и In^+ при $T > 900$ °C (рис. 1). При этом происходит сначала сегрегация Sb и формирование мелких наночастиц Sb. Атомы In

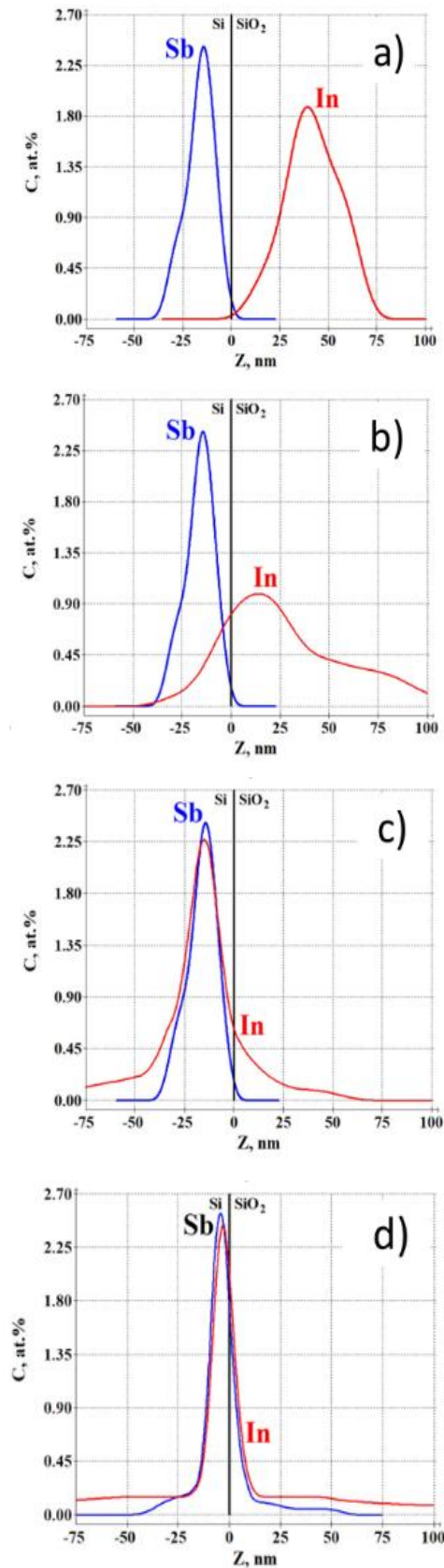


Рис. 1. Профили атомов Sb и In: а – без отжига; б – отжиг 1100 °С, 1 мин; с – отжиг 1100 °С, 3 мин; d – отжиг 1100 °С, 90 мин

диффундируют из слоя SiO_2 в пленку Si в область локализации атомов Sb. При длительном отжиге профили In и Sb одновременно смещаются на границу раздела Si/ SiO_2 .

Изменение в пространственном распределении атомов In и Sb приводило к кардинальному различию структурных свойств формирующихся в процессе отжига наночастиц. HRTEM анализ показал (рис. 2), что на начальных стадиях формирование нанокристаллов InSb происходит в пленке Si.

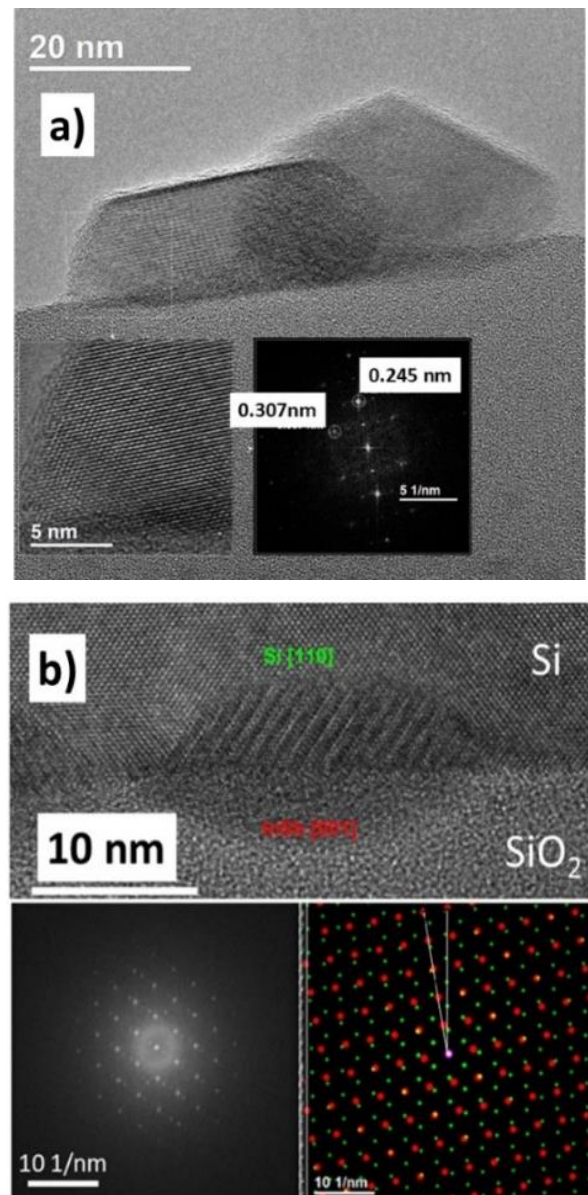


Рис. 2. HRTEM изображение нанокристаллов InSb и их Фурье-преобразования: а – отжиг 1100 °С, 1 мин; б – отжиг 1100 °С, 20 мин

Сравнение данных HRTEM и Raman показало, что нанокристаллы ориентированы матрицей кремния и гидростатически сжаты под давление 1.3 ГПа. По мере увеличения длительности отжига, нанокристаллы становятся полусферическими и вытянутыми вдоль границы раздела Si/SiO₂. Их разброс по размерам и объемная плотность имели немонотонный характер от времени отжига. Это может быть обусловлено как увеличением скорости зародышеобразования на границе раздела, так и изменением поверхностной энергии.

В решетках Si и нанокристаллов InSb были определены совпадающие направления Si[110]/InSb[001] и Si[110]/InSb[-114] и согласованные плоскости в этих направлениях. Эти условия являются достаточными для обеспечения эпитаксиального роста, несмотря на то что рассогласование объемных решеток Si и InSb составляет 19%.

В спектрах FTIR обнаружено высокоэнергетичное смещение края оптического

поглощения в нанокристаллах InSb, соответствующее ширине запрещенной зоны нанокристаллов 0.31-0.43 эВ. В спектрах PL и PLE обнаружены пики, соответствующие излучательной рекомбинации через уровни кислородных вакансий на границе раздела InSb/SiO₂.

Заключение

Изучены основные закономерности ионно-лучевого синтеза нанокристаллов InSb на границе раздела Si/SiO₂. Установлена взаимосвязь между структурными и оптическими свойствами нанокристаллов.

Работа поддержана грантами РНФ №19-72-30023, Правительства РФ №FZWM-2024-0011 и № FWGW-2025-0010.

Библиографические ссылки

1. Tyschenko I., Gutakovskii A., Zhang R., Vdovin V., Volodin V., Popov V. Change in the InSb nanocrystal growth direction at the Si/SiO₂ interface during ion-beam synthesis. *Materials Letters* 2024; 373: 137114.