

## ВЛИЯНИЕ ПОСТИМПЛАНТАЦИОННОГО ОТЖИГА НА ПРОФИЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ $\text{In}^+$ И $\text{Sb}^+$ В СЛОЕ $\text{SiO}_2$ МОП-СТРУКТУРЫ

В.Ю. Леоненко<sup>1), 2)</sup>, А.К. Федотов<sup>1)</sup>, В.С. Просолович<sup>2)</sup>, Ю.А. Федотова<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,  
ул. Бобруйская 11, Минск 220006, Беларусь,  
vs.4550817@gmail.com

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь,  
prosolovich@bsu.by

Исследуется влияние постимплантационного отжига на профили распределения ионов  $\text{In}^+$  и  $\text{Sb}^+$  в слое  $\text{SiO}_2$  гетероструктур  $\text{SiO}_2<\text{InSb}>/\text{Si}$ , приводящего к формированию нанокристаллов InSb и эволюции системы точечных дефектов. Исследуемые структуры изготовлены с использованием технологий кремний-на-изоляторе и ионно-лучевого синтеза. Имплантация ионов  $\text{Sb}^+$  и  $\text{In}^+$  в термически выращенный на подложке *p*-Si слой  $\text{SiO}_2$  (толщиной 280 нм) проводилась с энергией 200 кэВ дозами  $8.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Анализ распределения элементов по глубине выполнен методом масс-спектрометрии вторичных ионов. Показано, что увеличение температуры отжига  $T_a$  приводит к переходу от бимодального распределения ионов преимущественно в имплантированной области после  $T_a = 800^\circ\text{C}$  к появлению дополнительных максимумов концентрации ионов после  $T_a = 900^\circ\text{C}$ , определяемых процессами взаимодействия ионов с дефектами; и к переходу профилей распределения к асимметричной тримодальной форме после  $T_a = 1100^\circ\text{C}$  вследствие отжига точечных дефектов. Проанализированы механизмы диффузии In и Sb, определяющие форму профилей и формирование нанокристаллов InSb.

**Ключевые слова:** ионная имплантация; постимплантационный отжиг; масс-спектрометрия вторичных ионов; диффузия; точечные дефекты;  $\text{SiO}_2$ ; InSb.

## EFFECT OF POST-IMPLANTATION ANNEALING ON $\text{In}^+$ AND $\text{Sb}^+$ ION DISTRIBUTION PROFILES IN THE $\text{SiO}_2$ LAYER OF MOS-STRUCTURE

V.Yu. Leonenko<sup>1), 2)</sup>, A.K. Fedotov<sup>1)</sup>, V.S. Prosolovich<sup>2)</sup>, J.A. Fedotova<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, Minsk, 220006,  
11 Bobruiskaya Str., 220006 Belarus,  
vs.4550817@gmail.com

<sup>2)</sup>Belarusian State University,  
4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus,  
prosolovich@bsu.by

This study investigates the effect of post-implantation annealing on the distribution of  $\text{In}^+$  and  $\text{Sb}^+$  ions in the  $\text{SiO}_2$  layer of the  $\text{SiO}_2<\text{InSb}>/\text{Si}$  heterostructures obtained using the silicon-on-insulator and ion-beam synthesis technologies. A thermally grown  $\text{SiO}_2$  layer (280 nm thick) on a *p*-type Si substrate was implanted with  $\text{In}^+$  and  $\text{Sb}^+$  ions at an energy of 200 keV and a dose of  $8.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . The samples were annealed at temperatures  $T_a$  of 800, 900, and 1100  $^\circ\text{C}$  for 30 minutes in an  $\text{N}_2$  atmosphere with a Si capping layer preventing ion evaporation. The elemental depth profiles were analyzed using time-of-flight secondary-ion mass spectrometry utilizing a 30 kV  $\text{Bi}^+$  ion source. Results indicate that annealing significantly alters ion diffusion mechanisms. At  $T_a = 800^\circ\text{C}$ , a bimodal distribution of In and Sb ions was observed, with peaks near the surface and at the projected range depth ( $R_p \approx 110 \text{ nm}$ ). At  $T_a = 900^\circ\text{C}$ , an additional maximum appeared at the depth of  $\approx 2R_p$  due to Sb vacancy-assisted diffusion, resulting in the  $\text{Sb}^+$  profile broadening. Annealing at  $T_a = 1100^\circ\text{C}$  leads to an asymmetric profile with  $\text{Sb}^+$  redistribution towards the surface due to defect annihilation. These findings highlight that the competition between the ion diffusion coefficient increase and the annealing of point defects governs the formation of concentration profiles in the  $T_a$  range of 800–1100  $^\circ\text{C}$ , resulting in profile broadening at  $T_a = 900^\circ\text{C}$  and redistribution of Sb concentration towards the  $\text{SiO}_2$  surface at  $T_a = 1100^\circ\text{C}$ .

**Keywords:** ion implantation; post-implantation annealing; secondary-ion mass spectrometry; diffusion; point defects;  $\text{SiO}_2$ ; InSb.

## Введение

В современной электронике представляют интерес гетероструктуры типа  $\text{SiO}_2\text{-InSb}/\text{Si}$  с нанокристаллами (НК) InSb в слое  $\text{SiO}_2$ , получаемые комбинацией технологии кремний-на-изоляторе (КНИ), ионно-лучевого синтеза и последующего постимплантационного отжига. Имплантация ионов в слой  $\text{SiO}_2$  сопровождается возникновением большого количества точечных дефектов (ТД) в виде междуузельных атомов, вакансий и др. Проведение отжига приводит не только к формированию НК InSb, но и изменяет систему ТД в структуре за счет их аннигиляции и взаимодействия между собой. Результат этих процессов изменяет характер транспорта носителей заряда, что требует детального анализа распределения  $\text{In}^+$  и  $\text{Sb}^+$  в слое  $\text{SiO}_2$  и их взаимодействия с ТД после отжига. Последнее явилось основной целью работы.

## Результаты и их обсуждение

Изучаемые в работе гетероструктуры  $\text{SiO}_2\text{-InSb}/\text{Si}$  были изготовлены методом *DeleCut*, описанным в [1]. В термически выращенный на подложках *p*-Si слой  $\text{SiO}_2$  (280 нм) имплантировались ионы  $\text{Sb}^+$  и  $\text{In}^+$  с энергией 200 кэВ дозами  $8.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Для предотвращения испарения ионов в процессе отжига на имплантированный  $\text{SiO}_2$  переносился покрывающий слой Si. Изотропный отжиг структур КНИ проводился при температурах  $T_a = 800, 900$  и  $1100^\circ\text{C}$  в течение 30 минут в парах  $\text{N}_2$ . В результате отжига в захороненном слое  $\text{SiO}_2$  формировались НК InSb, структура и геометрические параметры которых зависели от  $T_a$  и описаны в [1]. Покрывающий слой Si удалялся в кипящем водном растворе  $\text{NH}_3$ .

Анализ распределения химических элементов по глубине в  $\text{SiO}_2\text{-InSb}/\text{Si}$  структурах, отожженных при разных  $T_a$ , был проведен методом масс-спектрометрии вторичных ионов на времязапорном масс-спектрометре вторичных ионов *ToF-SIMS-5*

(*ION-ToF*). В качестве источника ионов использовался висмутовый зонд с ускоряющим напряжением 30 кВ. В профилях распределения элементов по глубине оставлены только сигналы  $\text{In}^+$ ,  $\text{Sb}^+$ ,  $\text{SiO}^+$ .

Из рис. 1 (сплошные кривые) следует, что в результате отжига при  $800^\circ\text{C}$  формируется симметричное бимодальное распределение  $\text{In}^+$  и  $\text{Sb}^+$  по глубине: первый максимум расположен ближе к поверхности слоя  $\text{SiO}_2$ , а второй – вблизи среднего проективного пробега  $R_p$ , который для обоих ионов  $\approx 110$  нм. До глубины  $\approx 150$  нм профили распределения  $\text{In}^+$  и  $\text{Sb}^+$  похожи (интенсивности сигналов не нормированы и разнятся из-за различного ионного выхода). Согласно [1], именно в этой области преимущественно и сосредоточены НК InSb. На больших глубинах ионы  $\text{Sb}^+$  не наблюдаются, а концентрация  $\text{In}^+$  убывает с глубиной вплоть до границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Последнее связано с большим коэффициентом диффузии In, чем Sb. При  $T_a = 800^\circ\text{C}$  Sb практически неподвижен [2].

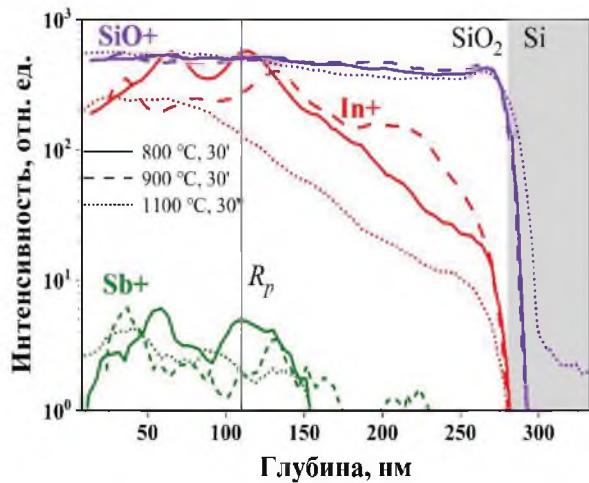


Рис. 1. Распределения концентрации  $\text{Sb}^+$ ,  $\text{In}^+$ ,  $\text{SiO}^+$  по глубине в ионно-имплантированном слое термически выращенного  $\text{SiO}_2$ , подвергнутого отжигу в течение 30 минут при  $T_a = 800$  (сплошные кривые), 900 (штриховые) и  $1100^\circ\text{C}$  (пунктирные)

Представленное на рис. 1 распределение In по глубине  $\text{SiO}_2$  после  $T_a = 800^\circ\text{C}$  соответствует двум разным механизмам диффузии [3, 4]. Одним из них выступает

междоузельный механизм диффузии одновалентных ионов  $In^+$ , а другой может быть интерпретирован как диффузия молекулы  $InOH$ , формирующейся за счет остаточных ионов  $H^+$  после осуществления водородного переноса при формировании КНИ структуры. Диффузия ионов по направлению к поверхности слоя  $SiO_2$  приводит к сегрегации  $In$  [4] и зародышеобразованию НК  $InSb$ . Формирование пиков профилей ионов на глубинах  $\approx 0.6R_p$  обусловлено их диффузией к области наибольших структурных нарушений в  $SiO_2$ , вызванных имплантацией, которые ведут себя как сток [2–5].

Как видно из рис. 1 (штриховые кривые), после  $T_a = 900$  °C наблюдаются три характерных максимума распределений ионов: у поверхности слоя  $SiO_2$ , вблизи  $R_p$  и на глубинах  $\approx 2R_p$ . При этом профиль  $Sb^+$  уширяется по сравнению с таковым после отжига при 800 °C.

Отметим, что те же закономерности были обнаружены и при изучении распределения имплантированных ионов из спектров резерфордовского обратного рассеяния (РОР) [1]. Как и в случае  $T_a = 800$  °C, виды профилей распределения  $In^+$  и  $Sb^+$  по глубине похожи.

Максимальная концентрация вакансий при  $2R_p$  [3] обуславливает формирование пика в профиле  $Sb^+$ , дифундирующего преимущественно по вакансационному механизму [2]. Малоподвижный  $Sb$  может выступать прекурсором фазы  $InSb$ , вследствие чего для  $In$  также наблюдается пик на  $2R_p$  [1].

Из рис. 1 (пунктирные кривые) следует, что после  $T_a = 1100$  °C происходит «стягивание» профиля  $Sb^+$  в сторону поверхности. В этом случае он имеет три моды, что для  $In^+$  не наблюдается. Профили становятся асимметричными: интенсивность сигнала (в частности, пиков для  $Sb^+$ ) увеличивается по мере приближения к поверхности, что согласуется со спектрами РОР [1].

«Стягивание» концентрационного профиля в работе [2] объяснено тем, что при  $T_a = 1000$  °C отжиг ТД в термически выращенном  $SiO_2$  завершается. При высоких  $T_a$  для ионов в упорядоченном слое  $SiO_2$

больше нет стоков в виде ТД на расстоянии  $2R_p$ , что и приводит к «стягиванию» профиля. Помимо этого, такая высокотемпературный отжиг приводит к испарению остаточных ионов  $H^+$ , способствовавших диффузии высокоподвижных молекул  $InOH$ . С другой стороны, при такой температуре увеличивается коэффициент диффузии  $Sb$ , что проявляется в сдвиге ее профиля к поверхности.

Стоит отметить, что при  $T_a = 1100$  °C в области кремниевой подложки наблюдается сигнал  $SiO^+$  относительно слабой интенсивности (в  $\sim 10^3$  раз меньший, чем в слое имплантированного  $SiO_2$ ). Это может быть обусловлено диффузией кислорода из слоя  $SiO_2$  в подложку в процессе высокотемпературного отжига, что сопровождается нарушением стехиометрии оксида. Другой причиной может быть перенос кислорода вглубь подложки вследствие бомбардировки тяжелыми ионами  $Bi^+$  (за счет эффекта перемешивания).

## Заключение

Показано, что постимплантационный отжиг оказывает значительное влияние на характер распределения  $In^+$  и  $Sb^+$  в слое  $SiO_2$  гетероструктуры  $SiO_2<InSb>/Si$ . Были выявлены различные механизмы диффузии, которые меняются в зависимости от температуры отжига.

При 800 °C наблюдается бимодальное распределение имплантированных ионов, связанное с их диффузией к области наибольшей концентрации ТД.

При 900 °C происходит уширение профиля  $Sb$  и появление дополнительного максимума на глубине  $2R_p$ , обусловленного вакансационным механизмом диффузии  $Sb$ . При 1100 °C профили приобретают асимметричную форму, а концентрация  $Sb$  смещается к поверхности из-за отжига ТД.

Таким образом, два конкурирующих процесса – увеличение коэффициента диффузии ионов с температурой (приводящее к диффузионному расплыванию профиля) и отжиг ТД – определяют формирование концентрационного профиля в диапазоне

температур 800-1100 °C, что проявляется в уширении и стягивании к поверхности слоя SiO<sub>2</sub> концентрационного профиля Sb.

### Библиографические ссылки

1. Tyschenko I. E., Voelskow M., Cherkov A.G., Popov V.P. Ion-beam synthesis of InSb nanocrystals in the buried SiO<sub>2</sub> layer of silicon-on-insulator structure. *Semiconductors* 2014; 48(9): 1196-1201.
2. Van Ommen A.H. Diffusion of ion-implanted Sb in SiO<sub>2</sub>. *Journal of Applied Physics* 1987; 61(3): 993-997.
3. Solmi S., Parisini A., Bersani M., Giubertoni D., Soncini V., Carnevale G., et al. Investigation on indium diffusion in silicon. *Journal of Applied Physics* 2002; 92(3): 1361-1366.
4. Van Ommen A.H. Diffusion of ion-implanted In and Tl in SiO<sub>2</sub>. *Journal of Applied Physics* 1985; 57(12): 5220-5225.
5. Риссель Х., Руге И. Ионная имплантация. Москва: Наука; 1983. 459 с.