

06;12

## **Анализ сверхтонких слоев имплантации мышьяка в кремнии методом вторично-ионной масс-спектрометрии**

© Д.С. Кибалов, О.М. Орлов, С.Г. Симакин, В.К. Смирнов

Институт микроэлектроники и информатики РАН, Ярославль

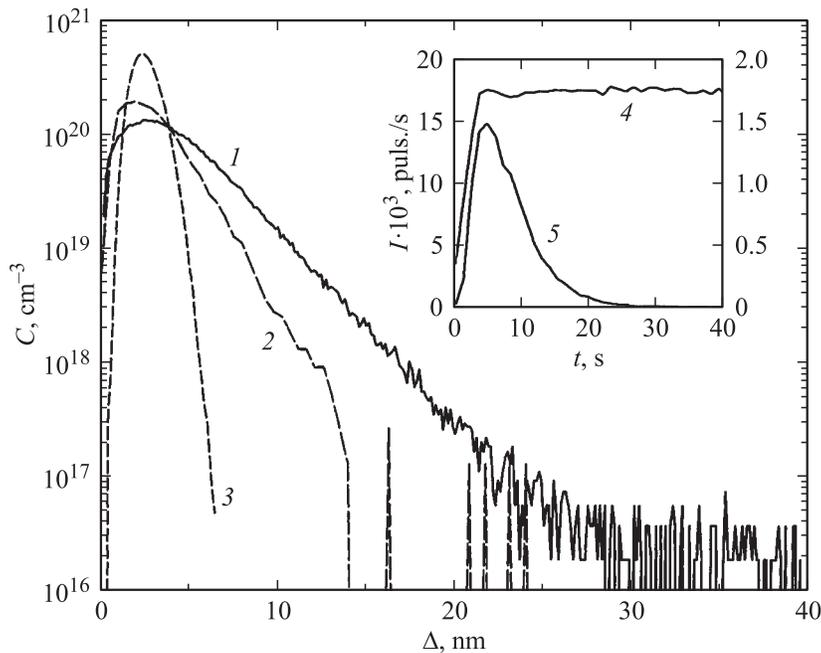
E-mail: IBTec@rambler.ru

*В окончательной редакции 25 мая 2004 г.*

Для метода вторично-ионной масс-спектрометрии на приборе IMS-4f Cameca продемонстрирован новый режим анализа, который позволил достичь разрешения по глубине  $\lambda = 1.4 \text{ nm}$  и получить распределения мышьяка в кремнии, близкие к истинным. В образцах кремния, имплантированных  $\text{As}^+$  через слой термического оксида толщиной  $20 \text{ nm}$  с энергией  $30 \text{ keV}$  и дозами  $(1.25 \div 3.13) \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , обнаружено формирование резкого пика мышьяка на границе оксид/кремний за счет диффузионного смещения мышьяка к данной границе после отжига.

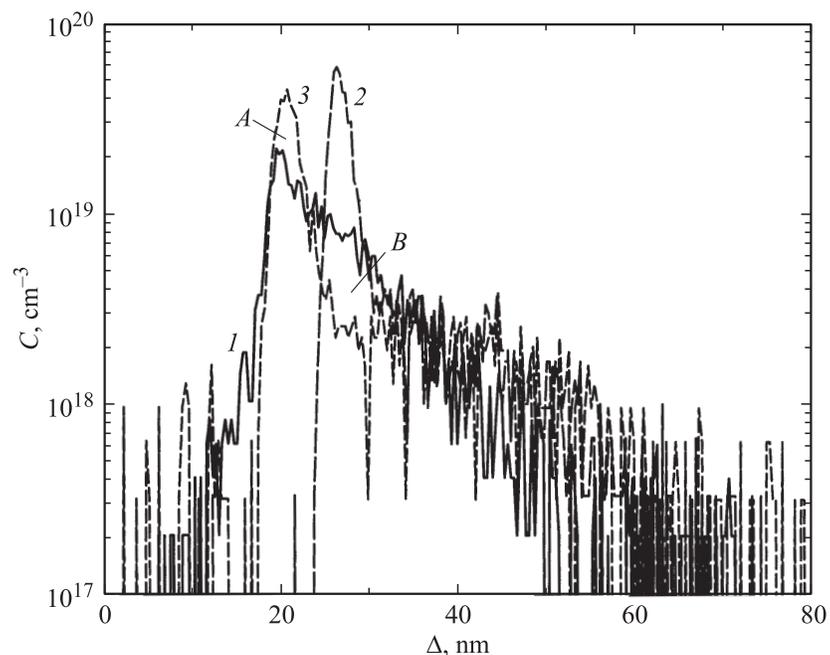
Для изготовления современных субмикронных полевых транзисторов требуется формирование мелких и сверхмелких (глубиной до  $50 \text{ nm}$ ) легированных областей в кремнии [1]. Послойный анализ таких областей, выполняемый методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) для отработки технологии легирования, должен проводиться с разрешением по глубине около  $1 \text{ nm}$ . Основной задачей настоящей работы являлось получение информации о распределении мышьяка в кремнии и изучение причин его трансформации после смены оксида и отжига.

Требуемое разрешение по глубине достигалось за счет оптимизации условий послойного анализа для магнитного секторного прибора ВИМС IMS-4f фирмы Cameca. По аналогии с работой [2] был опробован оригинальный режим анализа: отрицательные молекулярные первичные ионы — отрицательные молекулярные вторичные ионы. Как показано на рис. 1, использование нового режима дает значительный выигрыш в разрешении по глубине  $\lambda$ , равной толщине слоя в области экспоненциально спадающей части профиля, на которой происходит падение концентрации примеси в  $e$ -раз. Этот режим позволяет получить профиль



**Рис. 1.** Профили мышьяка, имплантированного в кремний с энергией 500 eV и дозой  $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  (стандартный образец). 1 — традиционный режим ВИМС: первичные ионы —  $\text{O}_2^+$ , вторичные ионы —  $\text{As}^+$ , разрешение по массам  $M/\Delta M = 4200$ , напуск кислорода  $2 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ ,  $\lambda = 2.6 \text{ nm}$ ; 2 — режим отрицательных ионов ВИМС: первичные ионы —  $\text{NO}_2^-$ , вторичные ионы —  $\text{AsSi}^-$ ,  $M/\Delta M = 2500$ , без напуска кислорода,  $\lambda = 1.6 \text{ nm}$ ; 3 — расчет по программе TRIM. Энергия первичных ионов 2 keV, угол бомбардировки  $59^\circ$ , шкала интенсивности ионного тока переведена в шкалу концентраций по дозе имплантации, время распыления переведено в глубины по результатам измерения глубин кратеров на профилометре Talystep. (Здесь  $C$  — концентрация,  $\Delta$  — глубина). На вставке приведены зависимости от времени интенсивности сигналов вторичных ионов для режима 2: 4 — матричного  $\text{Si}_2^-$  (шкала слева); 5 —  $\text{AsSi}^-$  (шкала справа).

As с изменением концентрации в интервале двух порядков величины на глубинах в диапазоне 10 nm. Из рис. 1 видно, что пиковое значение сигнала вторичных ионов  $\text{AsSi}^-$  находится в области стационарных



**Рис. 2.** Профили мышьяка в кремнии для исследованных образцов, содержащих слой термического оксида на поверхности. Шкала интенсивности ионного тока переведена в шкалу концентраций при помощи коэффициента относительной чувствительности, который измерялся для тестового образца кремния, имплантированного As с энергией 20 keV и дозой  $5.0 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ .

значений сигнала матричного иона  $\text{Si}_2^-$ . Глубина, отвечающая началу стационарного распыления, составляла около 1 nm.

Исходная пластина кремния КДБ-12 (100) со слоем термического оксида 20 nm на поверхности имплантировалась As с энергией 30 keV и дозой  $3.13 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . Профиль 1 послойного анализа As в кремнии для данного образца приведен на рис. 2. Отличительной особенностью применяемого режима анализа является крайне малый выход вторичных ионов  $\text{AsSi}^-$  из матрицы  $\text{SiO}_2$ , поэтому As регистрировался практически только в кремнии. Следующим объектом послойного анализа стала пластина, формирование которой дополнительно включало по сравнению с

исходной: удаление с поверхности слоя оксида толщиной 20 nm; создание нового оксида толщиной 15 nm при  $T = 850^\circ\text{C}$  в течение 55 минут; отжиг в атмосфере сухого азота ( $T = 850^\circ\text{C}$ , 4 часа). Профиль 2 для этого образца приведен на рис. 2 со сдвигом вглубь на 6.6 nm с учетом смены оксида, потому что при формировании оксида толщиной 15 nm поверхность кремния опускается относительно исходного уровня на указанное значение. Из рис. 2 видно, что указанные выше операции вызывают существенную трансформацию распределения As. В диапазоне концентраций от  $3.0 \cdot 10^{18}$  до  $6.0 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  As на профиле 2 распределен в виде узкого пика в области границы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Резкость спада данного пика характеризуется  $\lambda = 1.4 \text{ nm}$ . Близкие к указанному значения  $\lambda$ , как правило, достигаются при послойном анализе границ гетероструктур или образцов с  $\delta$ -слоями [3]. Это означает, что As с концентрацией свыше  $3.0 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  сосредоточен в тонком слое с очень резкой границей.

Интеграл по профилю 1 на рис. 2 дает дозу мышьяка  $2.09 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  в кремнии после имплантации в исходную структуру. Для профиля 2 доза оказалась равной  $2.06 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . Следовательно, смена слоя оксида и последующий отжиг не вызывают изменения общего содержания мышьяка в кремнии, а приводят к его перераспределению в области границы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Наблюдалась высокая воспроизводимость формы профиля с пиком для серии образцов. Для образцов, подвергнутых дополнительному отжигу ( $900^\circ\text{C}$ , 15 min) как до стадии основного отжига ( $T = 850^\circ\text{C}$ , 4 часа), так и после него, не обнаружено существенных различий в профилях послойного анализа As по сравнению с профилем 2 на рис. 2. Поэтому определяющим является отжиг в течение нескольких часов при температуре  $850^\circ\text{C}$ .

С целью установления влияния смены оксида на распределение As в кремнии данная операция была исключена из процесса формирования образца. Профиль 3 на рис. 2 представляет распределение As в исходной пластине кремния после отжига ( $850^\circ\text{C}$ , 3 часа). Видно, что формируется профиль распределения As с узким пиком в области границы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , аналогичный описанному ранее. Это свидетельствует о том, что для образования указанного пика As смена оксида в структуре не является необходимым условием.

Сравнение профилей на рис. 2 позволяет сделать следующее предположение о причинах формирования пика As. Его образование является следствием перемещения части As (при концентрации свыше

$2-3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) в область границы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . На это указывает то, что на рис. 2 доза As в области A ( $5.3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ) между профилями 3 и 1 близка к дозе в области B ( $4.0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ) между профилями 1 и 3. В пользу такого поведения As свидетельствует и известный факт диффузии междоузельных атомов кремния, порожденных ионной имплантацией, в направлении границы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Этот диффузионный поток атомов кремния вызывает в свою очередь аккумуляцию As в области границы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  [4]. В то же время на глубинах свыше 40 nm наблюдается уширение распределения As в результате отжига за счет диффузии As в глубь кремния. Следует отметить, что уменьшение полной дозы имплантации As до  $1.25 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  и времени отжига при температуре  $850^\circ\text{C}$  до 2 часов не вызывает изменения указанного выше уровня концентрации, а приводит только к снижению максимума концентрации пика до  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Таким образом, при имплантации As в структуру  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  с энергией 30 keV и дозами  $(1.25-3.13) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  отжиг вызывает перераспределение As за счет его диффузии в глубь кремния при концентрациях ниже  $2-3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , а при концентрациях выше указанного уровня As стремится в область границы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  с формированием узкого пика.

Точная оценка толщины слоя As в кремнии, прилегающего к границе  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , требует решения задачи восстановления истинного распределения примеси из его свертки с функцией разрешения [5]. Функция разрешения, отвечающая условиям послойного анализа, может быть корректно определена только с помощью образца, содержащего  $\delta$ -слой заданной примеси. Однако в первом приближении для оценки толщины слоя As в области границы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  можно воспользоваться данными послойного анализа стандартного образца, представленными на рис. 1. Если принять результаты моделирования с помощью программы TRIM за истинное распределение As, то можно получить степень уширения профиля 3 с глубиной за счет ионного перемешивания пучком первичных ионов. Из сравнения профилей 2 и 3 следует: уровень концентрации, в 10 раз меньший значения в максимуме профиля 2, смещен вглубь на 2.5 nm по отношению к истинной глубине; уровень в  $10^2$  раз меньшей концентрации — на 5.4 nm; уровень в  $10^3$  раз меньшей концентрации — на 8.4 nm. Использование этой информации в отношении профиля 2 на рис. 2 дает следующую оценку истинных глубин залегания мышьяка относительно границы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . На уровне концентрации, отвечающем основанию пика As ( $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), глубина составляет 3 nm, на уровне  $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  — 16 nm, на уровне  $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  — 31 nm.

В заключение следует отметить, что в традиционном режиме послойного анализа с использованием низкоэнергетичных ионов  $O_2^+$  задача настоящей работы на приборе IMS-4f не могла быть решена в полном объеме из-за недостаточного разрешения по глубине. Только благодаря применению нового режима анализа As в кремнии, обеспечивающего достижение разрешения по глубине  $\lambda = 1.4 \text{ nm}$  с пределом обнаружения  $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , стало возможным получение распределения As в кремнии в структуре  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , близкого к истинному, и установление причин формирования сложной формы измеренного распределения.

## Список литературы

- [1] *Thompson S., Packan P., Bohr M.* // Intel Technology J. 1998. Q3. P. 1–19.
- [2] *Simakin S.G., Smirnov V.K.* // Appl. Surf. Sci. 2003. V. 203–204. P. 314–317.
- [3] *Wittmaack K.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 1998. V. 16. N 5. P. 2776–2785.
- [4] *Sai-Halasz G.A., Short K.T., Williams J.S.* // IEEE Electron Dev. Lett. 1985. V. 6. P. 285–287.
- [5] *Dowsett M.G., Rowlands G., Allen P.N.* et al. // Surf. Interface Anal. 1994. V. 21. P. 310–315.