

УДК 621.315.592

Диффузия атомов In в пленках SiO₂, имплантированных ионами As⁺

© И.Е. Тысченко¹, М. Voelskow², Сы Чжунбинь³, В.П. Попов¹

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

² Institute of Ion-Beam Physics and Materials Research, Helmholtz-Center Dresden-Rossendorf, D-01314 Dresden, Germany

³ Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

E-mail: tys@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 19 ноября 2020 г.

В окончательной редакции 27 ноября 2020 г.

Принята к публикации 27 ноября 2020 г.

Изучена диффузия атомов индия в пленках SiO₂, предварительно имплантированных ионами мышьяка с разной энергией, в зависимости от температуры последующего отжига. Установлено, что диффузионные свойства индия зависят от присутствия в пленке атомов мышьяка и их энергии. Увеличение концентрации мышьяка в области средних пробегов ионов In⁺ предотвращает диффузию индия к поверхности SiO₂ при высоких температурах отжига и стимулирует диффузию In вглубь в форме одновалентного междоузлия. Обнаруженные эффекты объяснены с точки зрения формирования пар In–As в соседних замещающих положениях в матрице SiO₂.

Ключевые слова: индий, мышьяк, диффузия, оксид кремния, ионная имплантация.

DOI: 10.21883/FTP.2021.03.50597.9557

1. Введение

Исследование диффузии элементов III и V групп в пленках SiO₂ давно привлекало интерес исследователей в связи с их широким применением в кремниевой технологии [1–4]. В последние годы интерес к диффузионным свойствам этих элементов связан в основном с проблемами создания гетероструктур на основе соединений A^{III}B^V и кремния, объединение которых лежит в основе создания гибридных интегральных схем, способных обеспечить большие скорости передачи информации [5–8]. Одним из способов создания таких гетероструктур является ионно-лучевой синтез низкоразмерных кристаллов соединений A^{III}B^V [9,10]. При этом диффузионные свойства взаимодействующих атомов играют решающую роль в процессе формирования новой фазы, определяют структуру и стехиометрический состав синтезируемого соединения.

Диффузионные свойства элементов III и V групп в оксиде кремния кардинально отличаются от их свойств в кремнии. Это обусловлено в первую очередь тем, что их коэффициенты диффузии определяются химическим состоянием атомов в матрице диоксида кремния. Для элементов III и V групп эти состояния сильно отличаются. Атомы III группы таблицы Менделеева в SiO₂, как правило, находятся либо в трехвалентном состоянии, в котором они замещают атом кремния в решетке и четырежды координированы атомами кислорода, либо в одновалентном состоянии, в котором они располагаются в межузельном положении и связаны с атомом, расположенным в состоянии замещения [2,3]. В трехвалентном состоянии атомы III группы практически неподвижны.

В положении одновалентного междоузлия они диффундируют с энергией активации около 2 эВ. Этот диффузионный механизм считается ответственным, например, за испарение индия из SiO₂. Кроме двух вышеназванных состояний, в условиях избытка кислорода в матрице оксида кремния атомы III группы могут участвовать в образовании молекулы с радикалом OH (например, GaOH и InOH). Эти молекулярные комплексы не связаны с решеткой SiO₂ и обладают высокой диффузионной способностью в качестве нейтрального междоузлия [2,3].

Элементы V группы в матрице диоксида кремния могут находиться в положении замещения атома кремния или атома кислорода [1,4]. В положении замещения атома кремния элементы V группы имеют один неспаренный электрон. Такое состояние в решетке SiO₂ является не выгодным энергетически, и в этом случае атомы V группы могут быть легко вытеснены из узлового положения атомами кремния. Это определяет их достаточно высокую диффузионную способность. Отметим, что положение замещения атома кремния атомом V группы реализуется в условиях, когда в матрице оксида кремния присутствует избыточный кислород. В условиях недостатка кислорода атомы V группы в матрице SiO₂ замещают атомы кислорода, в результате чего формируются кислородные вакансии типа ≡A_V[•]–Si≡, где A_V[•] — атом V группы с одним неспаренным электроном. В положении замещения кислорода атомы V группы в SiO₂ практически неподвижны.

Итак, мы видим, что свойства атомов III и V групп в одних и тех же условиях могут быть абсолютно противоположными: атомы III группы, например, могут активно диффундировать в условиях недостатка кис-

лорода, а атомы V группы остаются неподвижными. Это означает, что присутствующие в решетке SiO_2 одновременно атомы III и V групп могут влиять на диффузионные свойства друг друга. Ранее нами было замечено, что присутствие в пленке диоксида кремния атомов сурьмы или мышьяка влияет на диффузионные свойства атомов индия [11,12]. В частности, было высказано предположение, что кластеры атомов Sb и As являются стоками для атомов In. С целью установления механизма влияния атомов V группы на диффузию атомов III группы в диоксиде кремния, в данной работе были изучены особенности диффузии атомов индия в лентках SiO_2 , предварительно имплантированных ионами As^+ , в зависимости от энергии ионов As^+ и температуры последующего отжига.

2. Методика экспериментов

Пленки SiO_2 толщиной ~ 280 нм были выращены термически на подложках монокристаллического кремния с ориентацией (100). Сначала имплантация пленок проводилась ионами As^+ с энергией 40 кэВ дозой $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, 80 кэВ дозой $9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ или 135 кэВ дозой $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ на ионном ускорителе ИМС-200. Плотность ионного тока составляла $0.5\text{--}0.6 \text{ мкА/см}^2$, температура мишени во время облучения была близка к комнатной. Затем из пластин были вырезаны образцы размером 2×2 см и на ионно-лучевой установке ИЛУ-200 (НИФТИ ННГУ, Нижний Новгород) они были облучены ионами In^+ с энергией 50 кэВ дозой $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Плотность тока ионов составляла $0.4\text{--}0.7 \text{ мкА/см}^2$. Согласно расчетам, выполненным с использованием программы SRIM, средний проецированный пробег ионов As^+ с энергией 40 кэВ был равен пробегу ионов индия $R_p^{\text{As}} = R_p^{\text{In}} \approx 32$ нм. Для ионов As^+ с энергией 80 кэВ средний проецированный пробег составлял 56.2 нм и был в ~ 2 раза больше пробега ионов In^+ , т. е. расстояние от максимума распределения атомов индия в SiO_2 до поверхности пленки было приблизительно равно расстоянию от R_p^{In} до R_p^{As} . При энергии ионов As^+ 135 кэВ $R_p^{\text{As}} = 89.5$ нм, что в 2.8 раза превосходило R_p^{In} . В каждом случае концентрация внедренных атомов в максимуме распределения, согласно предварительным расчетам по программе SRIM, составляла около 1.3–1.5 ат%. После имплантации пластины были разрезаны на образцы прямоугольной формы, которые отжигались при температуре от 700 до 1100 °С в течение 30 мин в потоке паров азота.

Распределение атомов индия и мышьяка до и после отжига исследовалось методом спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния (POP). В качестве зондирующего пучка использовались ионы He^+ с энергией 1.7 МэВ в режиме максимального отклонения зондирующего пучка от направления каналирования („random“). Угол рассеяния частиц составлял 170°. Профили распределения атомов индия и мышьяка рассчитывались из спектров POP с использованием программы RUMP (программное обеспечение NDF [13]).

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры POP пленок SiO_2 сразу после имплантации ионов As^+ с энергией 40 кэВ дозой $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, 80 кэВ дозой $9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ или 135 кэВ дозой $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и затем ионами In^+ с энергией 50 кэВ дозой $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Профили распределения имплантированных атомов индия и мышьяка, полученные из спектров POP путем соответствующих расчетов с использованием программы RUMP, показаны на рис. 2. Экспериментально полученные профили распределения внедренных атомов In и As хорошо описываются функцией распределения Гаусса. Параметры распределения

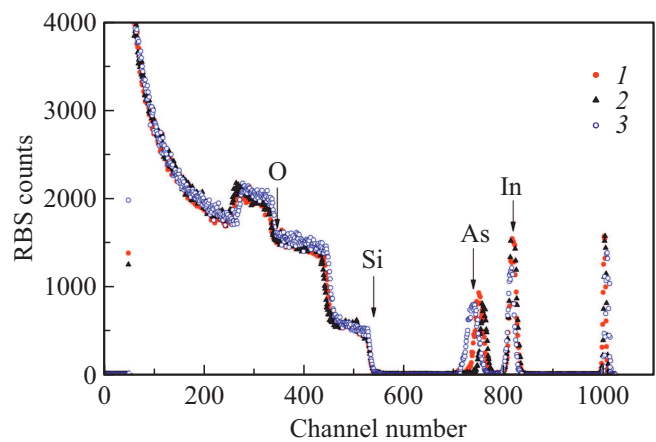


Рис. 1. Спектры POP пленок SiO_2 , имплантированных ионами As^+ с энергией 40 кэВ дозой $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (1), 80 кэВ дозой $9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (2) или 135 кэВ дозой $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (3) и ионами In^+ с энергией 50 кэВ дозой $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

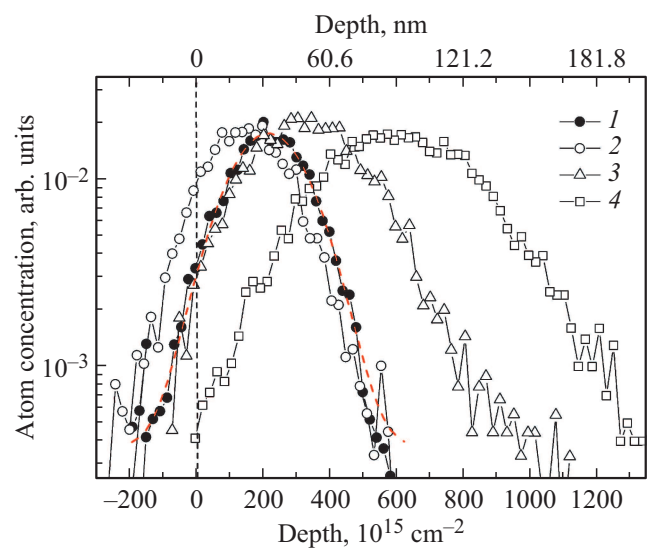


Рис. 2. Пространственное распределение атомов In (1), и атомов As (2–4), имплантированных в пленку SiO_2 с энергией 50 кэВ дозой $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (1), 40 кэВ дозой $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (2), 80 кэВ дозой $9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (3) или 135 кэВ дозой $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (4), рассчитанные из спектров POP.

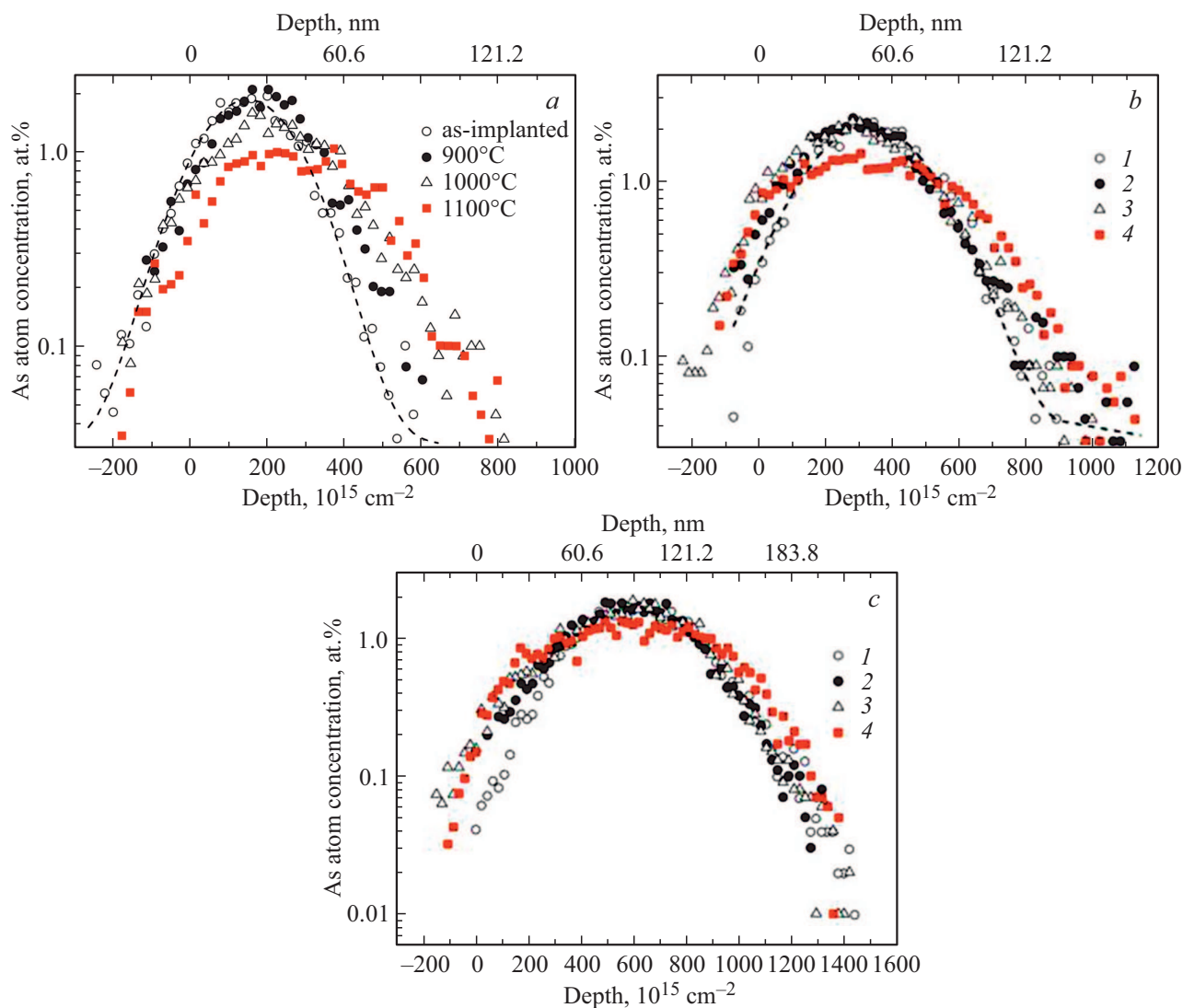


Рис. 3. Пространственное распределение атомов As в пленках SiO₂, имплантированных с энергиями 40 (a), 80 (b) и 135 кэВ (c) с соответствующими дозами, до (1) и после отжига при температуре 900 (2), 1000 (3) и 1100°С (4). Пунктирной кривой показано распределение Гаусса, которым описывается распределение атомов As сразу поле имплантации.

атомов In и As находится в хорошем соответствии с их значениями, рассчитанными с помощью SRIM.

На рис. 3 представлены профили атомов As, имплантированных с энергиями 40, 80 и 135 кэВ с соответствующими дозами, до и после отжига при температуре 900, 1000 и 1100°С. Пунктирной кривой показаны распределения Гаусса, которыми описываются профили атомов As сразу поле имплантации. Из рисунка видно, что атомы мышьяка остаются практически неподвижными вплоть до температуры отжига 1000°С. Начиная с $T = 1000^{\circ}\text{C}$, наблюдается слабая диффузия мышьяка из первоначального распределения Гаусса. Для ионов As⁺ с энергией 40 кэВ (рис. 3, a) наблюдается в основном диффузия в глубь пленки SiO₂ и практически отсутствует диффузия к поверхности. С ростом энергии ионов As⁺ асимметрия в диффузионном уширении профиля уменьшается и при энергии 135 кэВ профили

остаются симметричными при всех температурах отжига (рис. 3, c).

Оценить коэффициент диффузии ионов As из полученных экспериментально профилей распределения для температур отжига 1000 и 1100°С можно путем решения одномерного уравнения диффузии, используя 2-й закон Фика. В этом случае распределение Гаусса имеет вид [14]:

$$N_{\text{As}}(x) = \frac{N_{\text{max}}}{\sqrt{\Delta R_p^2 + 2D_{\text{As}}t}} \exp \left[-\frac{(R_p - x)^2}{2\Delta R_p^2 + 4D_{\text{As}}t} \right], \quad (1)$$

где R_p — средний проективный пробег ионов As, ΔR_p — страгглинг ионов As⁺, D_{As} — коэффициент диффузии мышьяка в SiO₂, t — время отжига, N_{max} — доза ионов As⁺. На рис. 4 представлены значения коэффициента диффузии мышьяка, рассчитанные из профилей распре-

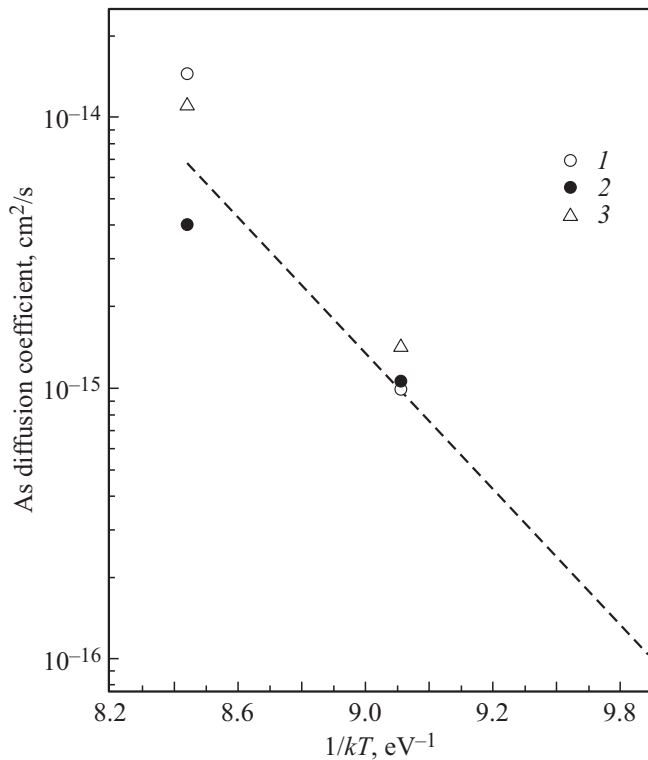


Рис. 4. Зависимость коэффициента диффузии мышьяка, рассчитанного из профилей распределения ионов As^+ с энергией 40 (1), 80 (2) и 135 кэВ (3), в зависимости от обратной температуры. Пунктирной кривой показана зависимость коэффициента диффузии ионов As, соответствующая выражению (1).

деления (рис. 3) для ионов As^+ с энергией 40, 80 и 135 кэВ после отжига при температуре 1000 и 1100°C с использованием выражения (1). Пунктирной линией показана зависимость коэффициента диффузии As от обратной температуры, соответствующая миграции As путем образования комплекса с атомом кислорода [1]:

$$D_{\text{As}/\text{SiO}_2} = 3 \cdot 10^{-4} \exp(-2.9 \text{ эВ}/kT) \text{ (см}^2/\text{с)}. \quad (2)$$

Из рисунка видно, что экспериментально полученные результаты, независимо от энергии ионов As^+ , достаточно хорошо совпадают с данными работы [1]. Это указывает на то, что присутствие в пленке SiO_2 атомов In практически не оказывает влияния на диффузию мышьяка. С другой стороны, диффузионные свойства мышьяка в сильной мере зависят от его концентрации [15–17]. При концентрациях $> 10^{19} \text{ см}^{-3}$ мышьяк обычно неподвижен вплоть до температуры $\sim 1200^\circ\text{C}$. Это обусловлено тем, что при больших концентрациях, когда расстояние между атомами сопоставимо с длиной их диффузии, происходит процесс гомогенного зарождения преципитатов As. В отсутствие поступления в пленку SiO_2 избыточного кислорода эти преципитаты стабильны до указанных температур отжига [15]. В наших экспериментах диффузия мышьяка активируется уже при температуре 1000°C, а для ионов с энергией 40 кэВ —

уже при 900°C. Это может быть объяснено, отжигом радиационных дефектов и высвобождением кислорода из связанного состояния при сегрегации индия на поверхности. Освободившийся кислород взаимодействует с атомами As с образованием пар As–O. Следует подчеркнуть, что профили As остаются в форме распределения Гаусса независимо от температуры отжига и энергии ионов. Это указывает на то, что в процессе диффузии мышьяка присутствует лишь один механизм.

На рис. 5 в полулогарифмическом масштабе представлены профили распределения атомов In, полученные путем обработки с использованием программы RUMP соответствующих спектров POP, после отжига при температуре 800–1100°C в пленках SiO_2 предварительно имплантированных ионами As^+ с разными энергиями. Из рисунка видно, что диффузия индия зависит как от температуры отжига, так и от энергии предварительно имплантированных ионов As^+ . При низких температурах отжига ($< 900^\circ\text{C}$) индий практически полностью локализован в области средних пробегов (рис. 5, a). При этом все же на глубине больше $\sim 90 \text{ нм}$ наблюдается незначительная асимметрия профиля в виде диффузионных хвостов в концентрациях $< 10\%$ от концентрации атомов в максимуме распределения. Профили индия в этих случаях достаточно хорошо описываются функцией распределения Гаусса.

Увеличение температуры отжига до 900°C (рис. 5, b) приводит к тому, что форма кривых распределения индия становится несимметричной. Наблюдается формирование хвостов распределения в глубь пленки SiO_2 , обусловленное диффузией атомов индия из области имплантации. На глубине $\sim 120 \text{ нм}$ наблюдается локализация достаточно большой части имплантированных атомов. Как видно из рис. 5, b, глубина проникновения индия слабо зависит от энергии ионов As^+ . Экспериментальные профили могут быть представлены в виде суперпозиции двух пиков в виде распределения Гаусса. Первый пик с максимумом на глубине 31.9 нм совпадает с глубиной среднего проективного пробега R_p^{In} ионов In⁺ с энергией 50 кэВ. Второй пик имеет максимум на глубине 87.5 нм, куда индий проникает за счет диффузии. Расстояние от R_p^{In} до второго максимума составляет 55.6 нм и может быть рассмотрено как диффузионная длина индия, диффундирующего по одному из известных механизмов. Коэффициент диффузии, соответствующий этой диффузионной длине при температуре 900°C за время 30 мин составляет $1.7 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$, что совпадает с величиной коэффициента диффузии индия в форме одновалентного междоузлия, рассчитанного в соответствии с выражением [3]

$$D_{\text{In}/\text{SiO}_2} = 7 \cdot 10^{-6} \exp(-2.0 \text{ эВ}/kT) \text{ (см}^2/\text{с)}, \quad (3)$$

который составляет $1.8 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$. При этом оценки коэффициента диффузии, соответствующего уменьшению концентрации атомов индия в максимуме распределения на глубине R_p^{In} за счет диффузии, сделанные из выражения (1) при условии $x = R_p^{\text{In}}$, а N_{max}

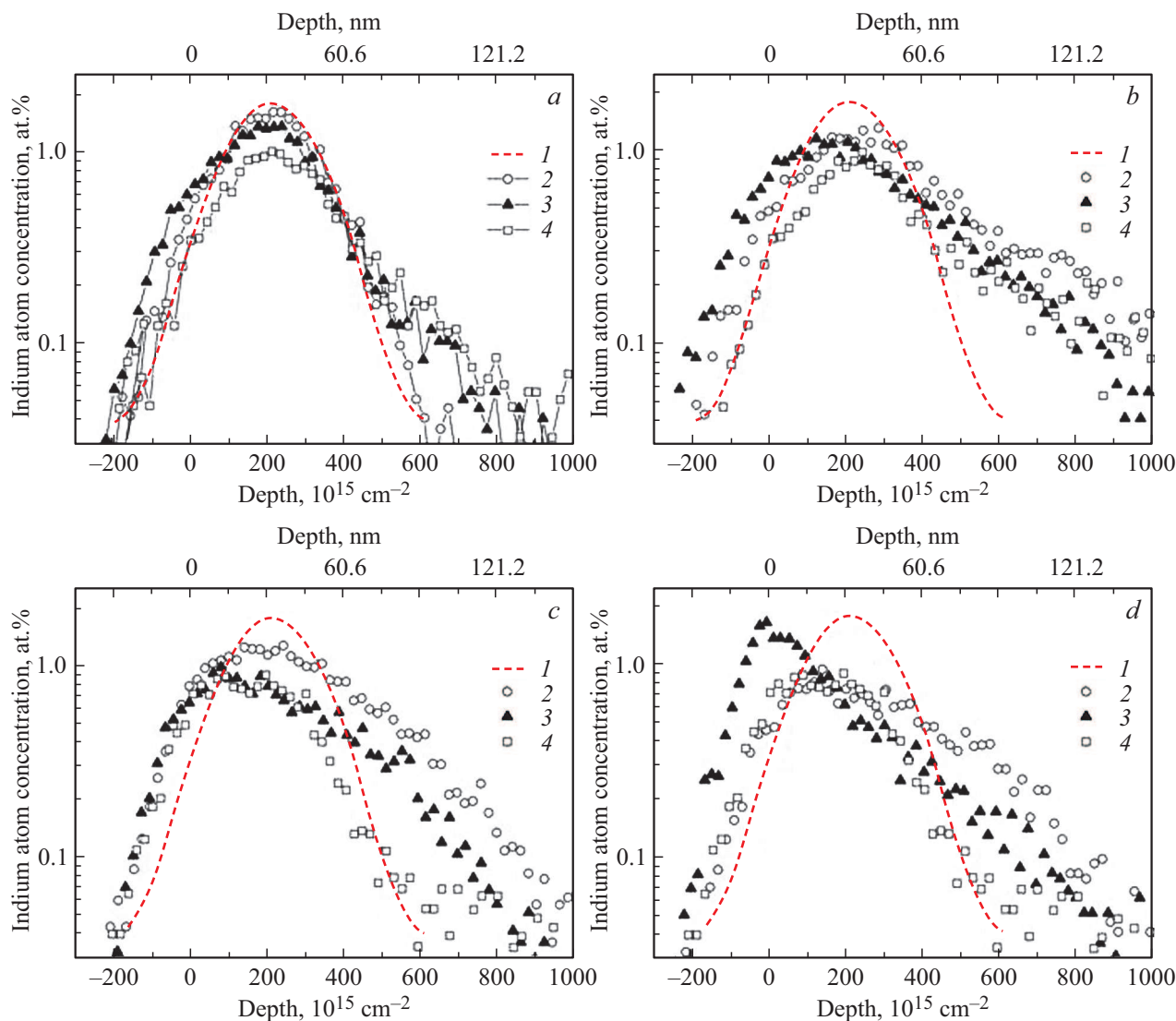


Рис. 5. Пространственное распределение атомов In в пленке SiO₂, в которую предварительно были имплантированы ионы As⁺ с энергиями 40 (2), 80 (3) или 135 кэВ (4) с соответствующими дозами, после отжига при температуре 800 (a), 900 (b), 1000 (c) и 1100°С (d). Пунктирной кривой (1) показано распределение Гаусса, которым описывается распределение атомов In сразу поле имплантации.

равно дозе индия, дают меньшую величину, равную $3.7 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2/\text{с}$. Это почти на порядок величины меньше значений, полученных выше. Для больших значений энергии ионов As⁺, предварительно имплантированных в пленку SiO₂, проседание профиля индия на глубине средних пробегов несколько увеличивается, что свидетельствует об увеличении доли диффундирующих атомов индия. Эти результаты указывают на то, что глубокое проникновение атомов индия обусловлено их взаимодействием с неравновесными дефектами в области R_p^{In} , формирующимися за счет тормозных потерь ионов мышьяка.

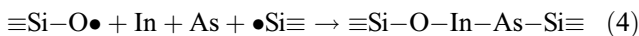
Дальнейший рост температуры отжига до 1000°С (рис. 5, c) сопровождается смещением максимума распределения атомов индия в сторону поверхности SiO₂. Этот эффект тем больше, чем больше энергия предва-

рительно имплантированных ионов As⁺. Одновременно наблюдается и уменьшение интегральной концентрации атомов In (площадь под кривой распределения атомов), которое может быть обусловлено его испарением из пленки SiO₂. Глубокое проникновение атомов индия при этом наблюдается лишь в образцах, предварительно имплантированных ионами As⁺ с энергией 40 или 80 кэВ. Причем, при энергии ионов As⁺ 40 кэВ этот эффект выражен сильнее, чем для энергии 80 кэВ. Рост температуры отжига до 1100°С усиливает эффекты смещения индия к поверхности и его потерю. Их зависимость от энергии ионов As⁺ остается такой же, как и при температуре отжига 1000°С.

Итак, полученные результаты показывают, что диффузия In достаточно сильно зависит как от температуры отжига, так и от энергии предварительно имплантирован-

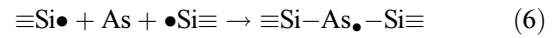
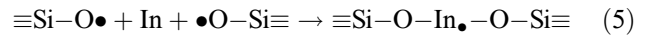
ных в SiO_2 ионов As^+ . При этом зависимость диффузии индия от энергии ионов As зависит и от температуры отжига. Анализ профилей распределения индия показывает, что их формирование является результатом трех механизмов. При низких температурах индий полностью сосредоточен в области пробега и неподвижен. При температуре отжига около 900°C наблюдается диффузия индия в глубь пленки SiO_2 , и глубина диффузии мало зависит от энергии предварительно имплантированных ионов As^+ . Начиная с $T = 1000^\circ\text{C}$, активируется диффузия индия к поверхности и его испарение из пленки SiO_2 . Эти процессы зависят от присутствия в пленке SiO_2 атомов мышьяка, причем тем сильнее, чем больше перекрытие их пространственного распределения с профилем индия. Иными словами, увеличение концентрации мышьяка в области средних пробегов ионов In^+ предотвращает диффузию индия к поверхности и его последующее испарение.

Для объяснения полученных нами эффектов, рассмотрим микроскопические процессы, протекающие в имплантированной матрице SiO_2 при последующем отжиге. Имплантация ионов In в SiO_2 сопровождается разрывом $\text{Si}-\text{O}$ связей и формированием дефектов, а именно, трижды координированных атомов кремния $\equiv\text{Si}\bullet$ (E' -центр) и нестикового кислорода $\bullet\text{O}-\text{Si}\equiv$ (дырка, захваченная на одиножды координированный атом кислорода) [18]. Постимплантационный отжиг приводит к восстановлению $\text{Si}-\text{O}$ связей. Одновременно с отжигом дефектов происходит и растворение в матрице SiO_2 имплантированных атомов In и As . При этом индий преимущественно замещает атомы кремния, а мышьяк — атомы кислорода. При низких температурах отжига, когда в пленку SiO_2 доступ извне избыточного кислорода ограничен, а профили имплантированных атомов In и As максимально перекрываются, процесс восстановления матрицы SiO_2 можно описать уравнением:



В этих положениях атомы индия трижды координированы атомами кислорода, а атомы мышьяка — атомами кремния, и являются практически неподвижными. Присутствие атомов In и As в соседних замещающих положениях может привести к формированию молекулярно-подобного $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ комплекса, аналогично тому как это происходит в кремнии [19]. Кулоновское взаимодействие атомов III и V групп может быть причиной снижения доли диффундирующих атомов индия, а также препятствием для формирования преципитатов мышьяка. При этом необходимо учесть, что часть As может находиться в положении замещения кремния, а часть атомов In — в положении одновалентного междоузлия. С ростом энергии ионов As^+ , когда профили индия и мышьяка перекрываются в меньшей степени, атомы In и As в этом случае также занимают соответственно положения замещения Si и O в матрице SiO_2 , но вероятность формирования пар $\text{In}-\text{As}$ снижается. Процессы восстановления матрицы в этом случае можно описать

независимыми уравнениями:



В этих положениях атомы In и As также неподвижны. Следует, однако, заметить, что при больших энергиях ионов мышьяка в области R_p^{In} происходит генерация дополнительных дефектов за счет упругих потерь энергии As^+ . Так, для ионов As^+ с энергией 80 кэВ максимум упругих потерь совпадает с максимумом распределения индия. Это облегчает протекание реакции (5). Поэтому, несмотря на то что роль атомов As снижается, доля атомов индия в связанном состоянии остается достаточно большой.

Увеличение температуры отжига до 1000°C способствует проникновению в пленку SiO_2 из атмосферы отжига атомов остаточного кислорода. Наличие избыточного кислорода способствует растворению атомов As в пленке SiO_2 в положении замещения кремния и образования $\text{As}-\text{O}$ связей. Это приводит, с одной стороны, к увеличению доли подвижных атомов мышьяка и, как следствие, к уменьшению концентрации пар $\text{In}-\text{As}$. С другой стороны, замещение атомами мышьяка атомов кремния создает конкуренцию и для атомов In при замещении кремния. Это способствует увеличению доли индия в межузельном положении. Следует, однако, подчеркнуть, что влияние мышьяка на диффузионную способность индия оказывается заметно сильнее, чем влияние дефектов и избыточного кислорода. Как видно из рис. 5, *d*, в том случае, когда профили индия и мышьяка совпадают, даже после отжига при температуре 1100°C доля неподвижного индия остается достаточно большой.

4. Заключение

Изучена диффузия атомов индия в пленках SiO_2 , предварительно имплантированных ионами мышьяка с разной энергией. Энергия ионов As^+ составляла 40, 80 или 135 кэВ, а энергия ионов In^+ была равной 50 кэВ. Это обеспечивало соответственно совпадение средних проективных пробегов ионов As^+ и In^+ , или их различие в 2 или в 2.8 раза. Пространственное распределение атомов индия и мышьяка изучено в зависимости от температуры последующего отжига в интервале $700-1100^\circ\text{C}$ в течение 30 мин в атмосфере паров азота. Установлено, что атомы индия практически не влияют на диффузионные свойства атомов мышьяка, не зависимо от энергии последних. Диффузионные свойства индия, наоборот, оказываются сильно зависящими от присутствия в пленке атомов мышьяка и их энергии. В том случае, когда профили распределения индия и мышьяка совпадают, большая доля атомов In остается в связанном состоянии вплоть до температуры 1100°C . И лишь $\sim 10\%$ индия диффундирует в глубь

пленки SiO₂ с коэффициентом диффузии, соответствующим миграции индия по межузельному механизму. При температуре 1100°C становится заметной доля индия, диффундирующего к поверхности SiO₂. С увеличением энергии ионов As⁺ доля индия в связанном состоянии с ростом температуры отжига падает, а диффузия In к поверхности SiO₂ доминирует уже при температуре 1000°C. Обнаруженные эффекты объяснены с точки зрения микроскопических процессов, протекающих в имплантированной матрице SiO₂ при последующем отжиге. А именно формированием пар In–As в соседних замещающих положениях путем замещения атомами In и As атомов кремния и кислорода соответственно, и зависимостью этого процесса от концентрации атомов мышьяка в области имплантации индия и температуры отжига.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.К. Васильеву и А.Н. Михайлову за проведение имплантации ионов In⁺, П.Л. Смирнову за проведение имплантации ионов As⁺.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (ГЗ 0306-2019-0005).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.H. van Ommen. *J. Appl. Phys.*, **56**, 2708 (1984).
- [2] A.H. van Ommen. *J. Appl. Phys.*, **57**, 1872 (1985).
- [3] A.H. van Ommen. *J. Appl. Phys.*, **57**, 5220 (1985).
- [4] A.H. van Ommen. *J. Appl. Phys.*, **61**, 993 (1987).
- [5] H. Ko, K. Takei, R. Kapadia, S. Chuang, H. Fang, P.W. Leu, K. Ganapathi, E. Plis, H.S. Kim, S.-Y. Chen, M. Madsen, A.C. Ford, Y.-L. Chueh, S. Krishna, S. Salahuddin, A. Javey. *Nature*, **468**, 286 (2010).
- [6] A.C. Ford, C.W. Yeung, S. Chuang, H.S. Kim, E. Plis, S. Krishna, C. Hu, A. Javey. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 113105 (2011).
- [7] K. Takei, R. Kapadia, H. Fang, E. Plis, S. Krishna, A. Javey. *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 153513 (2013).
- [8] S. Prucnal, Sh. Zhou, X. Ou, S. Facsko, M.O. Liedke, F. Bregolin, B. Liedke, J. Grebing, M. Fritzsche, R. Hubner, A. Mucklich, L. Rebohle, M. Helm, M. Turek, A. Drozdziel, W. Skorupa. *J. Appl. Phys.*, **115**, 074306 (2014).
- [9] S. Prucnal, M. Turek, A. Drozdziel, K. Pysznik, S.Q. Zhou, A. Kanjilal, W. Skorupa, J. Zuk. *Appl. Phys. B*, **101**, 315 (2010).
- [10] F. Komarov, L. Vlasukova, O. Milchanin, W. Wesch, E. Wendler, J. Zuk, I. Parkhomenko. *Mat. Sci. Eng. B*, **178**, 1169 (2013).
- [11] И.Е. Тыщенко, М. Фельсков, А.Г. Черков, В.П. Попов. *ФТП*, **48**, 1228 (2014).
- [12] И.Е. Тыщенко, М. Фельсков, А.Н. Михайлов, Д.И. Тетельбаум. *ФТП*, **53**, 1023 (2019).
- [13] C. Jeynes, N.P. Barradas, P.K. Marriott, G. Boudreault, M. Jenkin, E. Wendler, R.P. Webb. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36**, R97 (2003).
- [14] H. Ryssel, I. Ruge. *Ion implantation* (Wiley, Chichester, 1986) p. 478.
- [15] G.K. Celler, L.E. Trimble, K.W. West, L. Pfeiffer, T.T. Sheng. *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 664 (1987).
- [16] T. Yamaji, F. Ichikawa. *J. Appl. Phys.*, **64**, 2365 (1988).
- [17] R. Singh, M. Maier, H. Kräutle, D.R. Young, P. Balk. *J. Electrochem. Soc.*, **131**, 2645 (1984).
- [18] T.E. Tsai, D.L. Griscom. *Phys. Rev. Lett.*, **67**, 2517 (1991).
- [19] S.Yi. Shiryayev, A.N. Larsen, M. Deicher. *J. Appl. Phys.*, **72**, 410 (1992).

Редактор А.Н. Смирнов

Diffusion of In atoms in SiO₂ films pre-implanted with As⁺ ions

I.E. Tyschenko¹, M. Voelskow², Si. Zhongbin³, V.P. Popov¹

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

² Institute of Ion-Beam Physics and Materials Research, Helmholtz-Center Dresden–Rossendorf, D-01314 Dresden, Germany

³ Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The indium diffusion in the arsenic ion pre-implanted SiO₂ was studied as a function of As⁺ ion energy as well as the annealing temperature. It was obtained that the indium diffusion properties depend on the arsenic atom concentration and their energy. It was shown that As atoms placed at the depth of the In projective range prevent the In diffusion to the SiO₂ top surface at high annealing temperatures, and stimulates the depth In diffusion in form of monovalent interstitial atoms. The obtained effects are explained in the frame of the formation of In–As pairs in the neighboring substituted positions of the SiO₂ matrix.