

## ОСОБЕННОСТИ ДИФфуЗИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ОТЖИГЕ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ

Д.И. Бринкевич, В.С. Просолович, Ю.Н. Янковский  
Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Беларусь,  
тел. 017-2095051, e-mail: [prosolovich@bsu.by](mailto:prosolovich@bsu.by)

Исследовано поведение ионно-имплантированных примесей редкоземельных элементов в кремнии в процессе постимплантационного отжига. Установлена зависимость эффективности миграции редкоземельных элементов в зависимости от вида и дозы дополнительно внедренных основных легирующих примесей (В, Sb, Р). Наблюдаемые эффекты обусловлены диффузией иттербия к поверхности как под действием упругих напряжений несоответствия, так и вследствие повышенного содержания вакансий в аморфизованном приповерхностном слое. Существенную роль играет также движение данной примеси вместе с фронтом рекристаллизации.

### Введение

Как было ранее установлено, в кремнии, легированном лантаноидами при выращивании из расплава по методу Чохральского, в процессе роста монокристалла формируются включения второй фазы, которые существенно ограничивают возможности использования указанного материала для производства микроэлектронных приборов [1,2]. Альтернативный вариант легирования кремния РЗЭ заключается в использовании метода введения примесей, такого как ионная имплантация, позволяющего достигнуть более высокого уровня концентраций примесей в заданном объеме кристалла, повысить прецизионность и гомогенность легирования.

Учитывая высокую геттерирующую способность лантаноидов как в расплаве кремния, так и в твердой фазе, возможно также формирование стоков для фоновых технологических примесей и компонентов радиационных дефектов методом ионной имплантации РЗЭ, что весьма важно для совмещения данной операции с этапами технологических процессов изготовления приборов полупроводниковой микроэлектроники.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния постимплантационной термообработки на поведение примесей редкоземельных элементов, введенных в монокристаллический кремний методом ионной имплантации.

### Методика эксперимента

В экспериментах использовались пластины КДБ-0.3 с ориентацией (111), а также КЭФ-4.5 (100). Имплантация осуществлялась при комнатной температуре ионами  $\text{Er}^+$ ,  $\text{Yb}^+$ ,  $\text{Ho}^+$  с энергиями 35-120 кэВ дозами до 200 мкКл/см<sup>2</sup>, ионами  $\text{P}^+$ ,  $\text{V}^+$ ,  $\text{Sb}^+$  с энергией 35-60 кэВ и дозами до 1000 мкКл/см<sup>2</sup> в поверхность с разориентацией  $\sim 7^\circ$  от кристаллографических направлений с малыми индексами. Последующие изохронный (длительность 15 минут с шагом 25°C) и изотермический отжига проводились в вакууме. Профили распределения имплантированных примесей определялись методами вторичной ионной масс-спектрометрии и резерфордского обратного рассеяния. Для контроля поверхностных загрязнений пластин кремния использовалась электронная Оже-спектроскопия. Исследования методами эффекта Холла, электронного парамаг-

нитного резонанса, инфракрасного поглощения и отражения выполнялись в температурном интервале 77-300 К, фотолюминесценции – при 4.2 К.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Ранее было показано [3], что непосредственно после внедрения профиль распределения атомов Yb достаточно хорошо описывается распределением Гаусса. Полуширина ( $\Delta R_p$ ) профиля распределения РЗЭ зависела от ориентации подложки: для пластин КДБ-0.3 (111) она составляла по данным по данным масс-спектрометрии вторичных ионов 100 Å, для КЭФ-4.5(100) – 70 Å. Последующая имплантация основных легирующих примесей бора и фосфора не приводила к существенной трансформации профиля распределения лантаноида. С другой стороны, предварительное внедрение ионов  $\text{B}^+$  дозой 200 мкКл/см<sup>2</sup> и более или  $\text{Sb}^+$  изменяло передний фронт распределения иттербия (рис.3.2). При снижении дозы бора ниже 100 мкКл/см<sup>2</sup> указанный эффект не наблюдался. Аналогичные изменения переднего фронта имплантированной примеси наблюдались авторами [4] при имплантации бора в аморфный кремний и обусловлены подавлением эффекта каналирования. В рассматриваемом случае указанный эффект связан с имплантацией ионов иттербия через аморфизованный слой, созданный у поверхности предварительным внедрением ионов  $\text{B}^+$  и  $\text{Sb}^+$ . При изменении последовательности имплантации (предварительное внедрение ионов  $\text{Yb}^+$  с последующей имплантацией бора или фосфора) эффект изменения переднего фронта наблюдался для легирующей примеси, которая внедрялась через аморфизованный слой, созданный ионами РЗЭ.

Как было установлено, в процессе термообработки ионно-имплантированных слоев Si:B,Yb максимум распределения атомов иттербия сдвигается к поверхности; его концентрация в приповерхностном слое возрастает (рис.1). Миграция Yb к поверхности пластины наблюдается уже при 450°C. Ее эффективность возрастает с повышением температуры. После отжига длительностью 15 минут при 950°C подавляющее количество атомов лантаноида находится в приповерхностной области глубиной до 100 Å, увеличение длительности термообработки не приводит к дальнейшему существенному изменению вида про-

филя распределения РЗЭ. При увеличении длительности термообработки при  $950^{\circ}\text{C}$  наблюдается снижение его концентрации в приповерхностной области вследствие выхода примеси на поверхность. Об этом свидетельствуют также Оже-спектры указанных образцов, полученные при удалении поверхностных слоев кремния пучком ионов  $\text{Ar}^+$  со скоростью  $10\text{-}20 \text{ \AA}/\text{мин.}$ , при этом концентрация иттербия на поверхности составляла несколько атомных процентов. Уже через три минуты травления (глубина  $\sim 30 \text{ \AA}$ ) концентрация лантаноида становилась ниже предела чувствительности метода ( $0.1\% \text{ ат.}$ ).

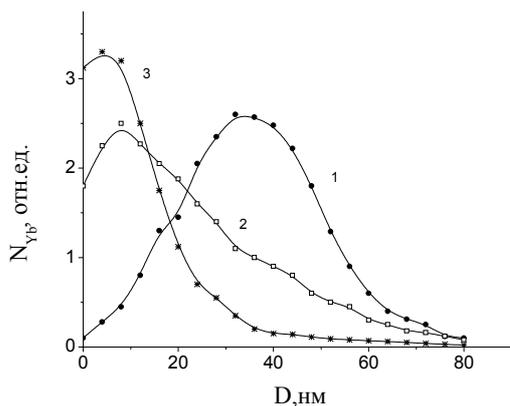


Рис. 1. Профили распределения Yb ( $E = 60 \text{ кэВ}$ ;  $D = 200 \text{ мкКл/см}^2$ ) после имплантации в пластины КДБ-0.3 (111) (1) и отжига длительностью 15 минут при температурах  $450^{\circ}\text{C}$  (2) и  $950^{\circ}\text{C}$  (3), измеренные методом РОР.

На скорость миграции атомов иттербия к поверхности существенное влияние оказывали многие факторы. Так, например, в имплантированных Yb пластинах КЭФ-4.5(100) рассматриваемый процесс протекал значительно интенсивнее, чем в пластинах КДБ-0.3 с ориентацией (111). Полученные экспериментальные результаты коррелируют с результатами исследований [95, 102-103] влияния ориентации подложки на кинетику кристаллизации слоев, аморфизованных полимерной имплантацией ионов  $\text{Si}^+$ , в которых было установлено, что скорость кристаллизации в образцах с ориентацией (100) при температуре отжига  $550^{\circ}\text{C}$  приблизительно в 25 раз выше скорости роста (111) ориентированных слоев. Кроме того, следует учитывать, что кристаллографической ориентации (100) соответствует менее плотная атомная упаковка, чем соответствующее значение для ориентации (111). Данное обстоятельство так же является весьма важным для скорости миграции атомов иттербия, имеющих существенно больший размер, чем атомы кремния.

Предварительная имплантация бора замедляла диффузию иттербия к поверхности (рис. 2), причем с ростом дозы имплантированного бора, указанный эффект проявлялся более отчетливо (кривые 2 и 3). Как известно при имплантации бора в приповерхностной области образуется аморфизованный слой. Последующее внедрение иттербия приводит к перекрытию нарушенных

областей, созданных ионами  $\text{B}^+$  и  $\text{Yb}^+$ . При этом, как сказано выше, происходит аннигиляция дефектов вакансионного и междоузельного типа, что подтверждают наши исследования методами ИК-поглощения и ЭПР. Таким образом, с увеличением дозы бора степень разупорядоченности приповерхностной области снижается, и учитывая вакансионный механизм диффузии иттербия, следует ожидать замедления его миграции к поверхности.

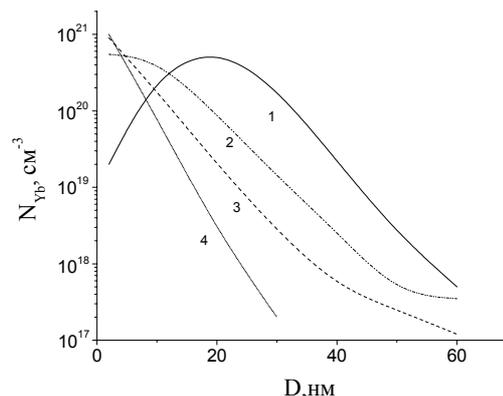


Рис. 2 Профили распределения атомов иттербия, измеренные методом ВИМС в образцах Si:Yb (1-3) и Si:Yb (4) непосредственно после имплантации (1) и после отжига  $t = 15 \text{ мин.}$  при температуре  $950^{\circ}\text{C}$  (2-4). Доза имплантированного бора,  $\text{мкКл/см}^2$ : 2 – 200; 3 – 20.

Замедление диффузии Yb к поверхности наблюдалось также и в образцах Si:Yb, P (рис. 3). Однако оно носило качественно другой характер, чем в образцах, имплантированных бором.

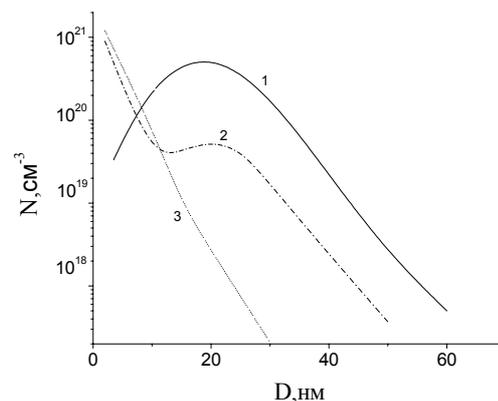


Рис. 3. Профили распределения иттербия после имплантации (1) и отжига при  $950^{\circ}\text{C}$  (2,3)  $t = 15 \text{ мин.}$  1, 3 – Si:Yb; 2 – Si:Yb, P, измеренные методом ВИМС.

В процессе отжига при  $450^{\circ}\text{C}$  наблюдается слабое смещение профиля распределения Yb к поверхности. Повышение температуры отжига усиливает миграцию лантаноида, однако, на глубине, соответствующей проецированному пробегу, остается четко выраженный пик, интенсив-

ность которого с увеличением длительности термообработки снижается. При этом профиль распределения иттербия со стороны объема пластины практически не претерпевает изменений, основная часть примеси движется к поверхности. В данном случае следует иметь в виду, что имеет место взаимодействие атомов Yb и P с образованием комплексов, включающих в свой состав атомы иттербия и фосфора. Данные комплексы, вероятно, не создают в решетке кремния значительных полей упругих напряжений и поэтому их движение в кристалле маловероятно. При температурах ~ 950°C возможен их распад с выделением реагентов, одним из которых является атомы лантаноида, мигрирующие к поверхности. Следует отметить, что миграция к поверхности примесей PЗЭ Er, Pr и Ho в процессе рекристаллизации при температурах 600-900°C аморфизованного имплантацией слоя наблюдалась также авторами [4,5].

Таким образом, объяснить полученные экспериментальные результаты можно с учетом следующих обстоятельств. Рекристаллизация аморфизованных имплантацией слоев кремния протекает при температурах  $\geq 600^\circ\text{C}$ , причем скорость процесса увеличивается с ростом температуры. При 450°C рекристаллизации не наблюдается; имеет место только перестройка и отжиг сформировавшихся при имплантации дефектов вакансионного типа [6]. Ранее, в [1], было показано, что образующиеся при облучении быстрыми нейтронами вакансии и их комплексы эффективно стимулируют процесс диффузии атомов редкоземельных примесей.

На основании этого возможно предположить, что при температурах порядка 450°C миграция атомов Yb к поверхности вызвана радиационно-стимулированной диффузией по вакансионному механизму. Направленность диффузии обусловлена как упругими напряжениями несоответствия, образующимися при имплантации, PЗЭ так и влиянием поверхности пластины. Миграция атомов лантаноида приводит к снятию указанных напряжений. При более высоких температурах (600 и 950°C) вследствие малости коэффициента сегрегации примеси имеет место образование узкого сегрегационного пика концентрации в аморфной фазе перед фронтом рекристаллизации и оттеснение его вместе с фронтом рекристаллизации к поверхности. Кроме того, в рабо-

тах [4,5] показано, что в слое  $\alpha$ -кремния вблизи фронта рекристаллизации коэффициент диффузии примеси PЗЭ Er более чем на 3 порядка может превышать аналогичное значение для монокристалла. Зависимость эффективности движения иттербия к поверхности от величины дозы внедренного бора отражает тот факт, что кроме миграции под действием упругих сил и смещения вместе с фронтом рекристаллизации, при температурах отжига 950°C имеет место вакансионный механизм диффузии лантаноида. Миграция примеси PЗЭ к поверхности при дополнительном внедрении фосфора тормозится вследствие взаимодействия с иттербием, результатом чего является формирование комплексов YbP.

### Заключение

Установлено, что в процессе высокотемпературного отжига наблюдается движение внедренной примеси PЗЭ к поверхности, причем в случае дополнительной имплантации бора данная миграция существенна уже при 450°C, когда рекристаллизации еще не происходит. Это обусловлено наличием приповерхностного аморфизованного слоя, содержащего в высокой концентрации многовакансионные комплексы, что существенно повышает коэффициент диффузии редкоземельного элемента. При температурах отжига свыше 600°C характер миграции к поверхности примесей PЗЭ в значительной степени зависит от условий дополнительного внедрения основных легирующих примесей. При дополнительном внедрении бора эффективность движения замедляется с увеличением дозы.

### Список литературы

1. Гусаков В.Е и др. // Электронная техника. Сер.6. Материалы. – 1989. – 4. – С. 29-32.
2. Дутов А.Г. и др. // Материалы 7-ой междунар. конф. по микроэлектронике. – Мн., 1990. – Т.1. – С.34-36.
3. Петров В.В. и др. // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1993. – 1. – С. 86-88.
4. Custer J.S. et al // Journal of Applied Physics. – 1994. – V. 75. - 6. – P. 2809- 2817.
5. Polman A. et al // Journal of Applied Physics. – 1997. – V. 81. - 1. – P.150-153 .
6. Комаров Ф.Ф., Новиков А.П., Соловьев В.С., Ширяев С.Ю. Дефекты структуры в ионно-имплантированном кремнии. – Мн.: Университетское, 1990. – 318 с.

## THE FEATURES OF RARE-EARTH ELEMENTS DIFFUSION AT THE ANNEALING OF IMPLANTED SILICON LAYERS

D.I. Brinkevich, V.S. Prosolovich, Yu.N.Yankovski  
Belarusian State University, Nezavisimosty ave., 4, 220050, Minsk, Belarus,  
tel. 017-2095051, e-mail: [prosolovich@bsu.by](mailto:prosolovich@bsu.by)

The behaviour of implanted rare-earth impurity at annealing of silicon was investigated. Dependence of efficiency of rare-earth atoms migration was established depending on a kind and a doze of in addition introduced alloying impurity (B, Sb, P). Observable effects were caused by ytterbium diffusion to a surface both under action of elastic pressure of discrepancy, and owing to the increased vacancies concentration in a surface layer. The essential role is played also with movement of the given impurity together with a front of recrystallization.