

хороший теплоотвод и высокая удельная мощность.

В заключении следует отметить некоторые уникальные возможности металлургических АТ, недоступные иным традиционным технологиям:

- рациональная равнопрочная облегченная конструкция детали;
- формирование каналов эффективного охлаждения (нагрева) с минимальным гидравлическим сопротивлением в теле детали или на ее поверхности;
- построение трехмерных крупногабаритных конструкций, заменяющих сборочные единицы, состоящие из десятков отдельных деталей;
- построение полиметаллических изделий, изготовленных с дискретным, либо плавным (градиентным) изменением состава, структуры и свойств материалов.

#### Литература

1. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
2. Порошковая металлургия – одна из первых аддитивных технологий / Ильющенко А.Ф., Савич В.В. // Аддитивные технологии, материалы и конструкции: Материалы науч.-тех. конф. (Гродно, 5-6 октября 2016 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А.И.Свириденко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2016. – С. 20–30.
3. High-strength porous biomaterials for bone replacement: A strategy to assess the interplay between cell morphology, mechanical properties, bone ingrowth and manufacturing constraints / Sajad Arabnejad, R. Burnett Johnston, Jenny Ann Pura, Baljinder Singh, Michael Tanzer, Damiano Pasini // Acta Biomaterialia 30 (2016) 345–356.
4. Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing – Innovation Roadmapping of Required Advancements / J.Gausemeier; N.Echterhoff, M.Wall // Heinz Nixdorf Institute,

- University of Paderborn. – Paderborn, 2013. – 106 p.
5. Аддитивные технологии в ПАО «ОАК». Департамент развития индустриальной модели. – Москва, 5 апреля 2016 года // [http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials\\_2016/3/3Boguslavskij.pdf](http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials_2016/3/3Boguslavskij.pdf).
6. Design the difference // <http://www.altair.com/design4am>.
7. Cost and practicality of in-process monitoring for metal Additive Manufacturing / Ch.Hole // Metal Additive Manufacturing. – 2016. – Vol. 2, No. 4. – P. 63-69.
8. DMLS Additive Metal Manufacturing / <http://burloaktech.com/additive-manufacturing/additive-metal-manufacturing>.
9. Siemens Achieves Breakthrough with 3D Printed Gas Turbine Blades // <https://www.3dprintingbusiness.directory/news/siemens-achieves-breakthrough-3d-printed-gas-turbine-blades/>.
10. Renishaw: Global Solutions Centres offer end-users an alternative route to develop new metal AM applications / R.Weston // Metal Additive Manufacturing. – 2016. – Vol. 2, No. 1. – P. 59-65.
11. Metal 3D printing: technology of the future for lighter and more compact engines / Press releases, 11.01.2017 // <http://corporate.renault-trucks.com/en/press-releases/2017-01-11-metal-3d-printing-technology-of-the-future-for-lighter-and-more-compact-engines.html>.
12. Изготовление полиметаллических деталей с помощью лазерных аддитивных технологий / Е. Раевский // Аддитивные технологии. – № 2. – 2017. – С.32-35.
13. Nano-Magnets and Additive Manufacturing for Electric Motors / Ajay Misra NASA Glenn Research Center // 8th Annual CAFE Electric Aircraft Symposium April 25, 26, 2014, Santa Rosa, California // <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140010481.pdf>.
14. Аддитивное производство металлических изделий (обзор) / В.В. Жуков, Г.М. Григоренко, В.А. Шаповалов // Автоматическая сварка. – 2016. – №5–6 (753). – С. 148-153.

УДК 621.382

### ВЛИЯНИЕ ВИДА ОСНОВНОЙ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ В КРЕМНИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИФфуЗИИ ИТТЕРБИЯ

Бринкевич Д.И.<sup>1</sup>, Оджаев В.Б.<sup>1</sup>, Просолович В.С.<sup>1</sup>, Янковский Ю.Н.<sup>1</sup>, Черный В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Получение более качественных кремниевых подложек для формирования компонентов полупроводниковой микроэлектроники возможно с помощью ионной имплантации редкоземельных элементов (РЗЭ). При легировании Si лантаноидами происходит формирование стоков для фоновых технологических примесей и

радиационных дефектов, благодаря высокой геттерирующей способности РЗЭ как в расплаве кремния, так и в твердой фазе [1, 2].

Целью работы являлось исследование влияния постимплантационной термообработки на поведение примесей редкоземельных элементов,

введенных в пластины монокристаллического кремния методом ионной имплантации.

Имплантация осуществлялась в пластины КДБ-0.3 с ориентацией (111) и КЭФ-4.5 (100) при комнатной температуре ионами  $Yb^+$  с энергиями  $E = 35-120$  кэВ дозами до  $D_{Yb} = 200$  мкКл/см<sup>2</sup>, а так же ионами  $P^+$ ,  $B^+$ ,  $Sb^+$  с энергией  $E = 35 - 60$  кэВ и дозами до  $D = 1000$  мкКл/см<sup>2</sup>. Изохронная (длительность 15 мин. с шагом 25 °С) и изотермическая термообработки (ТО) проводилась в вакууме. Профили распределения внедренных примесей определялись методами вторичной ионной масс-спектрометрии и резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Для контроля поверхностных загрязнений пластин кремния использовалась электронная Оже-спектроскопия.

Непосредственно после внедрения профили распределения атомов  $Yb$  достаточно хорошо описываются распределением Гаусса. Последующая имплантация основных легирующих примесей бора и фосфора не приводит к существенной трансформации профиля распределения лантаноида. Предварительное внедрение ионов бора  $D_B = 200$  мкКл/см<sup>2</sup> и более или сурьмы приводило к изменению приповерхностной части профиля распределения иттербия. При снижении дозы имплантации бора менее 100 мкКл/см<sup>2</sup> указанный эффект не наблюдался. По-видимому, такие изменения обусловлены имплантацией  $Yb^+$  через аморфизованный слой, созданный у поверхности предварительным внедрением  $B^+$  или  $Sb^+$ . При изменении последовательности имплантации (предварительное внедрение  $Yb^+$  с последующей имплантацией бора или фосфора) эффект изменения переднего фронта наблюдался для легирующей примеси, которая внедрялась через аморфизованный слой, созданный РЗЭ.

В процессе термообработки ионно-имплантированных слоев Si:B,Yb максимум распределения атомов иттербия сдвигается к поверхности и концентрация  $Yb$  в приповерхностном слое возрастает (рисунок 1). Миграция РЗЭ к поверхности пластины наблюдается уже после ТО при  $T = 450$  °С. Ее эффективность возрастает с повышением температуры. После отжига ( $T = 950$  °С, 15 мин.) подавляющее количество атомов лантаноида находится в приповерхностной области на глубине до 100 Å.

В пластинах КЭФ-4.5(100), имплантированных  $Yb^+$  рассматриваемый процесс протекал значительно интенсивнее, чем в КДБ-0.3(111). Это обусловлено тем, что кристаллографической ориентации (100) соответствует менее плотная атомная упаковка, чем соответствующее значение для ориентации (111).

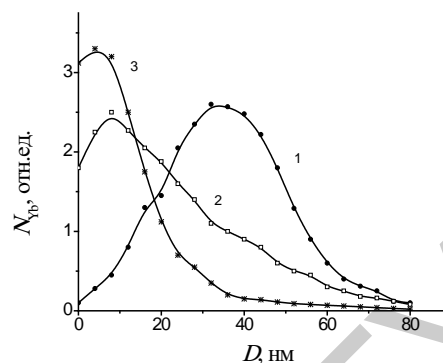


Рисунок 1 – Профили  $Yb$  ( $E = 60$  кэВ;  $D_{Yb} = 200$  мкКл/см<sup>2</sup>) после имплантации в пластины КДБ-0.3(111) (1) и отжига при  $T = 450$  °С (2) и  $950$  °С (3), 15 мин

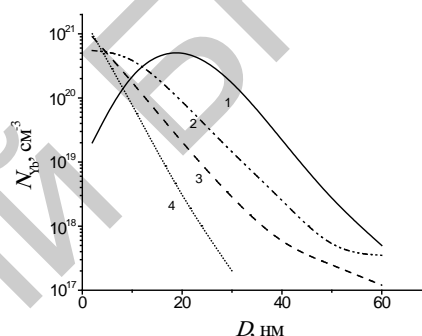


Рисунок 2 – Профили иттербия в Si:B,Yb (1–3) и Si:Yb (1, 4) после имплантации (1) и ТО при  $T = 950$  °С (2–4), 15 мин. Доза бора, мкКл/см<sup>2</sup>: 2–200; 3–20

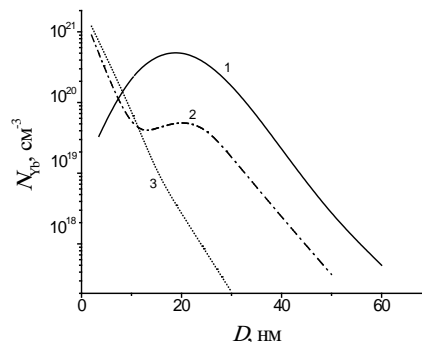


Рисунок 3 – Профили иттербия после имплантации (1) и отжига  $T = 950$  °С (2,3), 15 мин. 1, 3 – Si:Yb; 1, 2 – Si:Yb,P

Предварительная имплантация бора замедляла диффузию  $Yb$  к поверхности (рисунок 2), причем с ростом дозы имплантированного бора, указанный эффект проявлялся более отчетливо (кривые 2 и 3). Как известно [3], при имплантации бора в приповерхностной области образуется аморфизованный слой. Последующее внедрение иттербия приводит к перекрытию нарушенных областей, созданных ионами  $B^+$  и  $Yb^+$ . Таким

образом, с увеличением дозы бора степень разупорядоченности приповерхностной области снижается, и учитывая вакансионный механизм диффузии иттербия, следует ожидать замедления его миграции к поверхности.

Замедление диффузии Yb к поверхности наблюдалось также и в Si:Yb,P (рисунок 3). Однако оно носило качественно другой характер, чем в образцах Si:B. В процессе ТО  $T = 450^\circ\text{C}$  наблюдается слабое смещение профиля распределения Yb к поверхности. Повышение температуры отжига усиливает миграцию лантаноида, однако, на глубине соответствующей проецированному пробегу остается четко выраженный пик, интенсивность которого с увеличением длительности ТО снижается. При этом профиль распределения иттербия со стороны объема пластины практически не претерпевает изменений, основная часть примеси движется к поверхности. В данном случае имеет место взаимодействие атомов Yb и P с образованием комплексов, включающих в свой состав атомы обеих примесей. Данные комплексы, вероятно, не создают в кремнии значительных полей упругих напряжений и поэтому их движение в кристалле маловероятно.

При облучении быстрыми нейтронами, образующиеся вакансии и их комплексы, эффективно стимулируют процесс диффузии атомов редкоземельных примесей [1]. Вероятно, при  $T = 450^\circ\text{C}$  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 ( $T = 600$  и  $950^\circ\text{C}$ ) вследствие малости коэффициента сегрегации примеси имеет место образование узкого сегрегационного пика

концентрации в аморфной фазе перед фронтом рекристаллизации и отеснение ее вместе с фронтом рекристаллизации к поверхности. Известно [4, 5], что в слое  $\alpha$ -кремния вблизи фронта рекристаллизации коэффициент диффузии примеси PЗЭ Eg 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  $T=950^\circ\text{C}$  имеет место и вакансионный механизм диффузии лантаноида. При дополнительном внедрении фосфора миграция PЗЭ к поверхности менее заметна вследствие формирования комплексов, включающих в свой состав атомы P и Yb.

Установлено, что в процессе высокотемпературной ТО наблюдается движение внедренной примеси PЗЭ к поверхности, причем в случае дополнительной имплантации бора данная миграция существенна уже при  $T = 450^\circ\text{C}$ , когда рекристаллизации еще не происходит. При  $T > 600^\circ\text{C}$  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.

#### Литература

1. Гусаков В.Е и др. // Электронная техника. Сер.6. Материалы. – 1989. – №.4 – С.29-32.
2. Петров В.В. и др. // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1993. – № 1. – С.86-88.
3. Odzhaev V.B. et al // J.Applied Physics A. – 1996. – V. A62. – P. 355-358.
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.

УДК 621.32+53.087.351+535.21:(667.635+667.637)

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КРАСОК

Рыжевич А.А.<sup>1</sup>, Митьковец А.И.<sup>1</sup>, Смирнов А.Г.<sup>1</sup>, Машенко А.Г.<sup>1</sup>, Железнякова Т.А.<sup>1,2</sup>, Гореленко А.Я.<sup>3</sup>, Захарич М.П.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Республиканское научно-техническое унитарное предприятие «КРИПТОТЕХ» Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

Для проведения экспериментальных исследований в рамках научно-исследовательской работы «Фотонная сушка токопроводящих красок. Шифр «ФСТК» по договору № 531 «ФСТК» от 20 апреля 2016 г. были скомплектована и смонтированы две экспериментальные установки. Первая установка для исследования процессов

ФСТК была создана на основе мощной импульсной ксеноновой лампы (рисунок 1) и собрана по модульному принципу на колесном шасси 1. На верхней огражденной полке закреплен блок питания 2 типа БПЛ 66/33У или БПЛ 75/33У. Ниже внутри каркаса шасси установлена подвижная рама 3, к которой регулировочными