

## Формирование преципитатов в Si, имплантированном ионами $^{64}\text{Zn}^+$ и $^{16}\text{O}^+$

© В.В. Привезенцев<sup>1</sup>, Е.П. Кириленко<sup>2</sup>, А.В. Горячев<sup>2</sup>, А.В. Лютцау<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технологический институт Российской академии наук,  
117218 Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,  
124498 Москва, Зеленоград, Россия

<sup>3</sup> АО НПП „Пульсар“,  
105187 Москва, Россия

E-mail: v.privezentsev@mail.ru

(Получена 9 августа 2017 г. Принята к печати 26 октября 2017 г.)

Представлены результаты исследования приповерхностного слоя кремния и формирования преципитатов в образцах CZ *n*-Si(100), последовательно имплантированного при комнатной температуре ионами  $^{64}\text{Zn}^+$  с дозой  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  и с энергией 100 кэВ и ионами  $^{16}\text{O}^+$  с той же дозой, но с энергией 33 кэВ, так, чтобы их проекционные пробеги  $R_p = 70 \text{ нм}$  совпадали. После имплантации образцы в течение 1 ч отжигали в инертной среде Ar в температурном диапазоне 400–900 °С с шагом 100 °С. Профили имплантированных примесей исследованы методом времяпролетной вторично-ионной масс-спектрометрии. Визуализация поверхности Si проведена с помощью растрового электронного микроскопа, а приповерхностного слоя с помощью карт элементов, полученных методом электронной оже-спектроскопии с профилированием по глубине. После имплантации ионов Zn и O в аморфизованном слое кремния происходит образование текстуры ZnO(002). После отжига в среде Ar при температуре 700 °С в рекристаллизованном монокристаллическом слое Si обнаружены кристаллиты ZnO(102) с размером 5 нм.

DOI: 10.21883/FTP.2018.08.46205.8702

### 1. Введение

В настоящее время свойства металлических наночастиц и наночастиц (НЧ) оксидов металлов в полупроводниковых и прозрачных диэлектрических матрицах широко исследуются ввиду их возможного применения в современных опто- и микроэлектронных устройствах [1]. НЧ из оксида цинка играют важную роль, так как ZnO является прямозонным материалом с шириной запрещенной зоны 3.37 эВ и имеет большую энергию связи в экситоне — 60 мэВ. Поэтому они могут использоваться в детекторах УФ излучения [2], лазерах [3] и электро-люминесцентных дисплеях [4]. Благодаря своим уникальным свойствам ZnO может быть использован в солнечных элементах [5], газовых датчиках [6] и запатентованных устройствах (мемристорах) [7]. Поскольку Si широко используется в микроэлектронике, наночастицы Zn и ZnO в кремниевой подложке имеют важное значение, так как устройство обработки сигнала может быть сформировано на одном кристалле с источником самого сигнала. Известно несколько попыток сформировать наночастицы Zn и ZnO в кремнии с помощью ионной имплантации и термического окисления [8–10]. Здесь мы приводим результаты формирования НЧ в матрице Si, имплантированной ионами  $^{64}\text{Zn}^+$  и  $^{16}\text{O}^+$ . Предварительные результаты работы докладывались ранее [11].

### 2. Образцы и методики эксперимента

Подложки из монокристаллического *n*-Si(100) были имплантированы ионами  $^{64}\text{Zn}^+$  с энергией 50 кэВ и

дозой  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , а затем ионами  $^{16}\text{O}^+$  с энергией 16 кэВ с такой же дозой. Для того чтобы избежать заметного нагрева подложки в обоих случаях плотность ионного тока в пучке была менее  $j \leq 0.5 \text{ мкА/см}^2$ .

Зависимости распределения имплантированных в образец примесей и их соединений по глубине были исследованы методом времяпролетной вторично-ионной масс-спектрометрии (ВП ВИМС) на приборе TOFSIMS-5 (Ion TOF GmbH). Для профильного анализа травление проводилось ионами  $\text{Cs}^+$  (при анализе ионов  $\text{O}^-$ ,  $\text{ZnO}^-$  и  $\text{SiO}^-$ ) и ионами  $\text{O}_2^+$  (при анализе ионов  $\text{Zn}^+$ ) с энергией 1 кэВ, размеры области травления  $300 \times 300 \text{ мкм}^2$ . Первичный пучок ионов  $\text{Bi}^+$  имел следующие параметры: энергия 30 кэВ, ионный ток пучка 1.2 нА, размер области анализа  $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ . Было проанализировано наличие следующих ионов:  $^{16}\text{O}^-$ ,  $\text{ZnO}^-$ ,  $\text{SiO}^-$ ,  $\text{SiO}_2^-$ ,  $^{64}\text{Zn}^+$ , а также ионов матрицы  $^{28}\text{Si}^+$  и  $^{28}\text{Si}^-$ . Глубина кратера ионного травления измерялась на контактном профилометре AlphaStep D-120 (KLA-Tencor).

Элементный анализ преципитатов по глубине подложки проводился методом электронной оже-спектроскопии на сканирующем оже-спектрометре РНИ-670xi (Physical Electronics). Этот прибор оснащен электронной пушкой с термополевой эмиссией (катод Шоттки) и ионной пушкой с дифференциальной откачкой для очистки поверхности и травления образца ионами  $\text{Ar}^+$  при профильном анализе. Оже-анализ проводился при ускоряющем напряжении первичных электронов 5 кВ. При регистрации спектров первичный ток был 20 нА, а при получении изображения в режиме вторичных и оже-

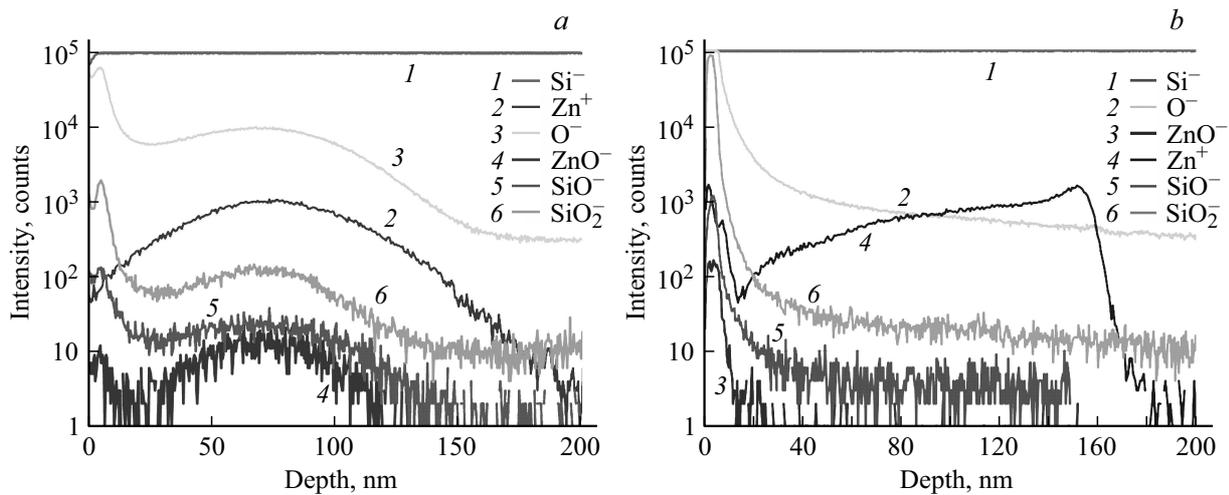


Рис. 1. Зависимости распределения ионов Zn и O по глубине в образце Si после имплантации (а) и после отжига в Ar при температуре 800°C в течение 1 ч (b).

электронов он составлял 1 нА для лучшего латерального разрешения, при этом диаметр электронного пучка был равен 50 нм. Ионное травление проводилось при ускоряющем напряжении 2 кВ и токе пучка 0.5 мкА. Ионное травление проводилось под углом наклона плоскости образца на 10° относительно оси ионного пучка для получения „полирующего“ травления.

Рентгено-фазовый анализ (РФА) состава имплантированного материала был проведен с помощью метода дифракции рентгеновских лучей в скользящей геометрии в угловом режиме сканирования  $\theta - 2\theta$ . Идентификацию химических фаз осуществляли с помощью дифрактометра Unisantis XMD-300 (Europe GmbH) с медным анодом (длина волны  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ). Работа прибора основана на схеме рентгеновского нефокусированного параллельного пучка (метод Дебая-Шеррера). Псевдопараллельный первичный пучок рентгеновского излучения формировался с помощью поликапиллярной полулинзы (конденсора) Кумахова. Его сходимос-рассеиваемость была 12'', т.е. составляла 5–10% от общей интенсивности пучка. Рентгеновский детектор представлял собой mBraun линейный позиционно-чувствительный пропорциональный газовый детектор проточного типа. В результате при любом положении рентгеновской трубки Oxford 5011 интерференционная картина дифракции могла быть одновременно зафиксирована в угловом диапазоне 0–10°. Величина углового смещения окна детектора была выбрана  $\Delta = 5^\circ$  по отношению к началу сканирования в положительную сторону.

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Анализ распределения примесей Zn и O на времяпролетном вторично-ионном масс-спектрометре

**3.1.1. ВП ВИМС образца Si после имплантации ионами Zn<sup>+</sup> и O<sup>+</sup>.** На рис. 1,а представлены зави-

симости распределения ионов цинка Zn<sup>+</sup> и кислорода O<sup>-</sup> по глубине после их последовательной имплантации. Из этих зависимостей следует, что распределение имплантированного Zn по форме близко к нормальному, простирается до глубины 200 нм и имеет максимум на глубине 70 нм, что соответствует расчетному значению по программе SRIM [12]. Распределение имплантированного O имеет максимум на той же глубине 70 нм и, кроме того, максимум на глубине 10 нм, что, по-видимому, связано с образованием загрязнения на поверхности подложки толщиной 10 нм соединениями углерода (C), образовавшимися после имплантации Zn и перед имплантацией кислорода O, и сегрегацией имплантированного кислорода O на границе раздела пленка углерод–кремниевая подложка. Соединения с кислородом (окислы), в том числе и окись цинка (ZnO), образовались в момент имплантации Zn и O, повторяют форму распределения кислорода и имеют два максимума: узкий — около поверхности и широкий — в толще подложки на глубине 70 нм. На поверхности образца находится слой углеводородов (загрязнения) толщиной 5–7 нм. Возможно, это связано с тем, что имплантация ионов O<sup>+</sup> проводилась после имплантации ионов Zn<sup>+</sup>. Образование углеродных соединений является причиной появления первого пика в распределении кислорода и его соединений по глубине (сегрегации примеси на границе слоя соединений углерод–кремниевая подложка). Таким образом можно утверждать, что в приповерхностном слое представлены смеси фаз SiO-SiO<sub>2</sub> и Zn-ZnO.

**3.1.2. ВП ВИМС образца Si после отжига имплантированного образца.** На рис. 1, б представлены зависимости распределения ионов Zn<sup>+</sup> и O<sup>-</sup> после отжига имплантированного образца при температуре 800°C в аргоне. Из этих зависимостей следует, что при отжиге произошла восходящая диффузия Zn, поэтому положение основного максимума распределения цинка

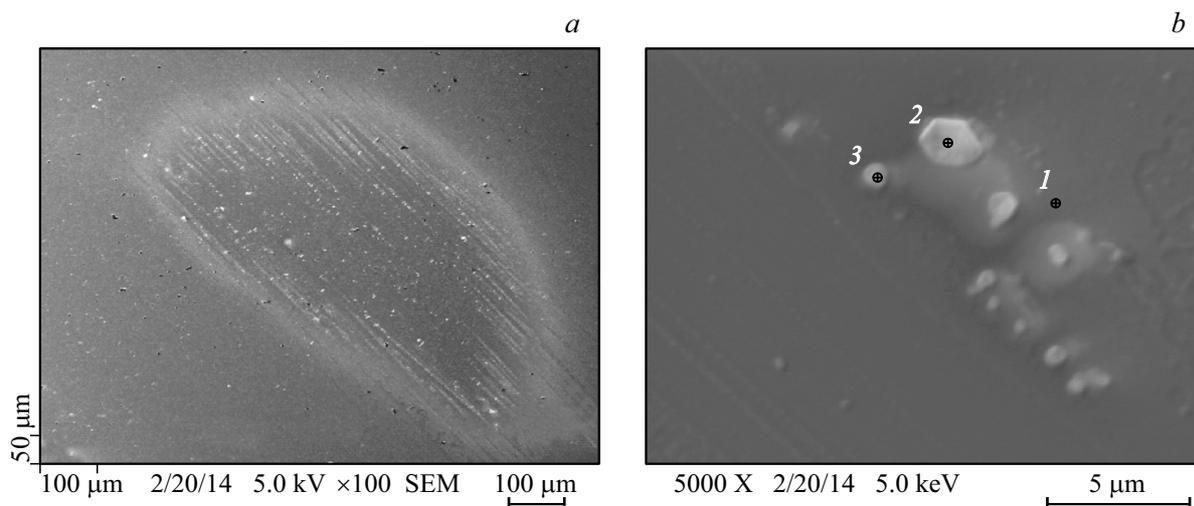


Рис. 2. РЭМ-ВЭ изображения дна кратера травления на глубине 58 нм при разном увеличении: *a* — малом и *b* — большом.

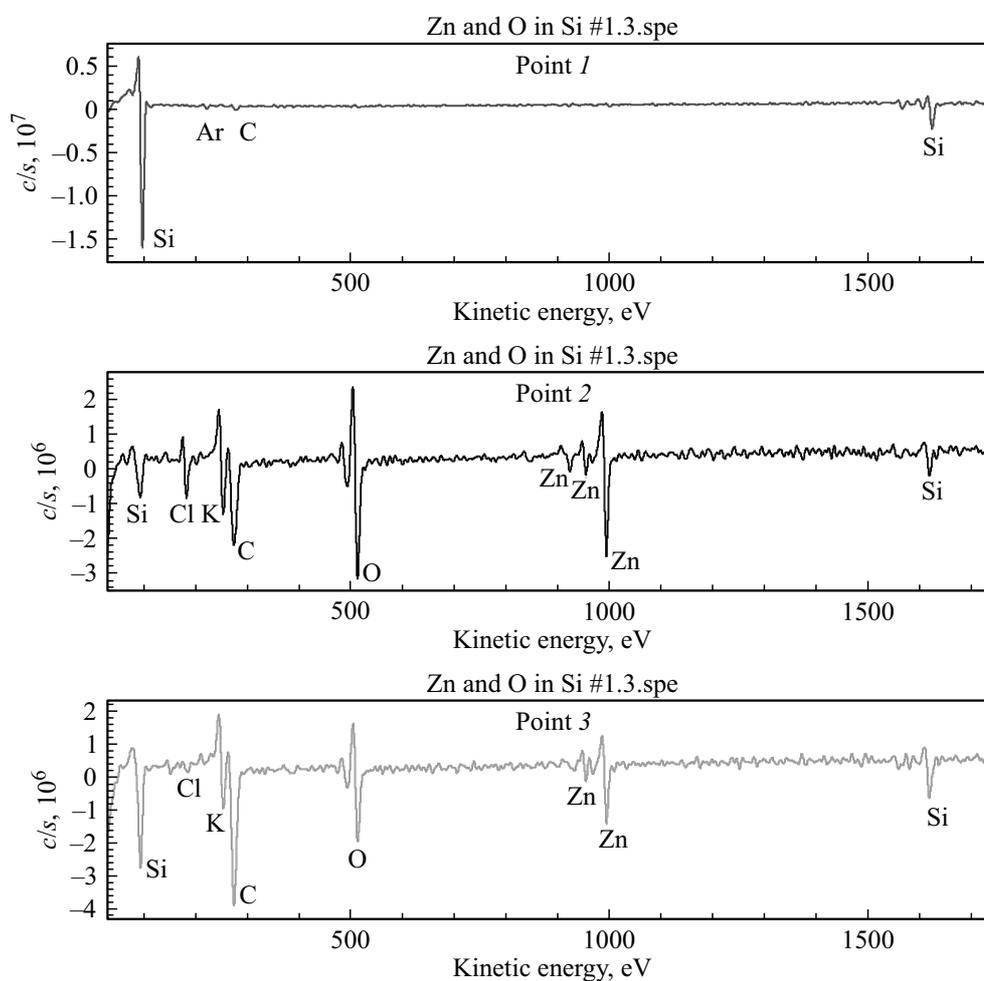
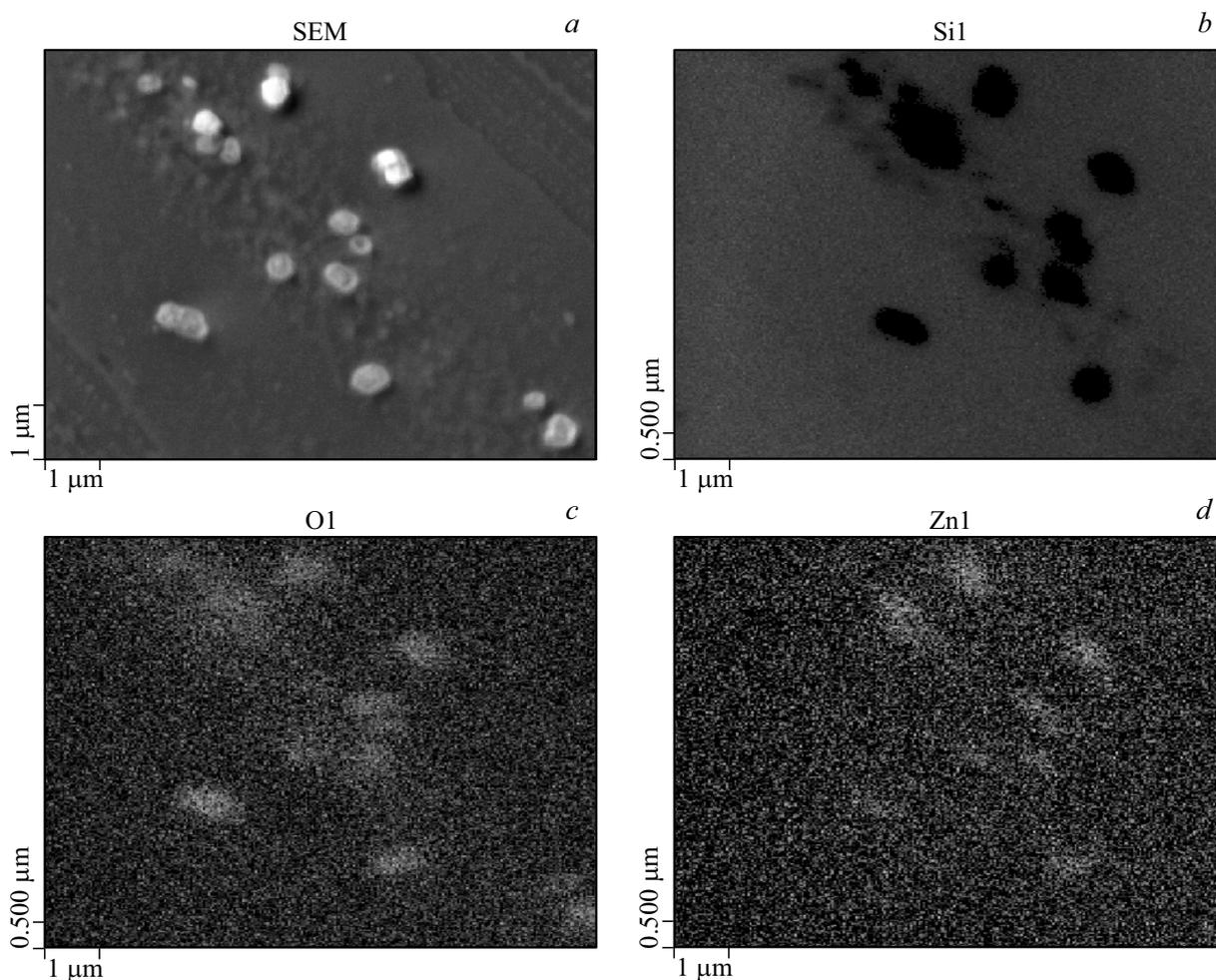


Рис. 3. Оже-спектры, полученные в точках, указанных на рис. 2, *b*.

переместилось в глубь подложки кремния на глубину 150 нм, а максимум, находящийся около поверхности пластины, сместился еще ближе к поверхности и расположился на глубине 5 нм. Из полученных данных также

видно, что при отжиге кислород (O) и его соединения (окислы) диффундируют к поверхности. Эти соединения имеют один максимум на глубине 5 нм. Интенсивность сигналов ионов  $\text{SiO}^-$  и  $\text{SiO}_2^-$  возросла: это может быть



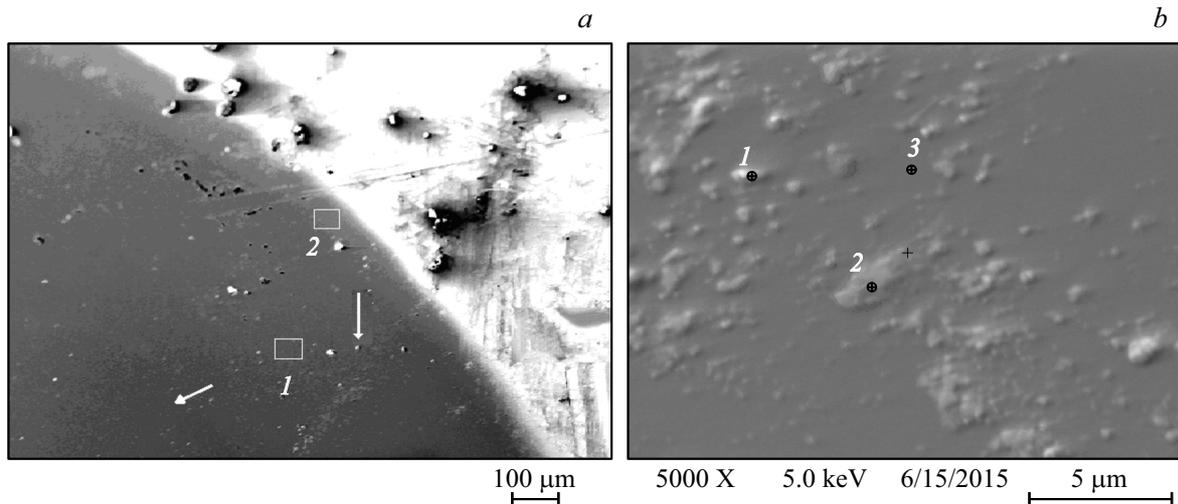
**Рис. 4.** РЭМ-ВЭ изображение поверхности образца (а) и карты распределения в оже-электронах для элементов Si (85 эВ) (b), O (513 эВ) (c) и Zn (994 эВ) (d).

вызвано как тем, что кислород при отжиге в атмосфере Ar может диффундировать к поверхности подложки, так и взаимодействием примеси кислорода O с матрицей кремния Si. При отжиге в аргоне ион оксида цинка  $ZnO^-$  взаимодействует с кремнием с образованием других соединений, например  $Zn_2SiO_4$  в малых концентрациях. Следует отметить, что упомянутая выше силикатная фаза Zn данным методом не была выявлена.

### 3.2. Анализ преципитатов на сканирующем оже-спектрометре

**3.2.1. Оже-спектроскопия образца Si после имплантации ионами  $Zn^+$  и  $O^+$ .** На дифференциальном оже-спектре поверхности образца кремния после имплантации ионами Zn и O обнаружены небольшие пики Si(LVV) — 85 эВ и O(LVV) — 515 эВ, а также примеси N и интенсивный оже-пик углерода C(LVV) — 272 эВ, который свидетельствует о том, что поверхность образца сильно загрязнена углеводородами.

На рис. 2 представлены РЭМ-ВЭ изображения дна кратера ионного травления на глубине 58 нм при двух увеличениях: малом (a) и большом (b). На рис. 2, a видно, что на дне кратера видны „полосы“, вдоль которых расположены „яркие“ островки-преципитаты. На рис. 3 приведены дифференциальные оже-спектры, полученные для указанных на рис. 2, b точек 1, 2 и 3. Из этих спектров следует, что в „ярких“ преципитатах (точки 2 и 3), кроме Si, Zn и O, присутствуют также загрязнения углеродом, а также технологические примеси Ag, Cl и K. На оже-спектре на рис. 3, b для точки 2 видны оже-пик цинка с кинетической энергией Zn(LVV) — 992 эВ и оже-пик кислорода O(KLL) — 515 эВ. Таким образом, основными компонентами преципитатов являются цинк и кислород. Оже-пики от атомов матрицы кремния Si(LVV) — 85 эВ в этих преципитатах незначительны. На спектрах присутствуют также оже-пики от загрязнения упоминавшимся ранее углеродом C(LVV) — 272 эВ, а также оже-пики калия (K) и хлора (Cl). Появление последних элементов связано с процессами химической очистки пластин и оснастки перед процессом имплан-



**Рис. 5.** РЭМ-ВЭ изображение поверхности кратера травления: *a* — малое увеличение, *b* — большое увеличение для области *1*. Стрелками указаны более темные области с пониженным содержанием примесей.

тации. Вне преципитатов (рис. 3, *a* для точки *1*) детектируются только пики от атомов матрицы кремния Si(LVV) — 85 эВ, а также оже-пики от технологической примеси Ag и от загрязнений углеродом (C). Вне преципитатов имплантированных примесей цинка и кислорода или нет, или их концентрации ниже предела чувствительности метода. Таким образом, можно сделать следующий вывод, что преципитаты состоят из оксида цинка ZnO.

На дифференциальном оже-спектре для неяркого бугорка в режиме „multiplex“ (накопление) (100 сканов на энергетическое окно) кроме оже-пигов цинка Zn(LVV) — 994 эВ и кремния Si(LVV) — 92 эВ присутствует пик кислорода O(LLV) — 513 эВ, а также пик углерода C(KLL) — 272 эВ. Иначе говоря, преципитаты для неяркого бугорка состоят из оксида цинка ZnO, но на них осели загрязнения углеродом (C), а также технологические примеси Cl и K, возникшие при химической обработке Si пластин перед технологическими процессами. В темном „бугорке“ (точка *1*) в основном детектируются Si, малое количество Zn и O, а также загрязнения C. На дифференциальном оже-спектре в режиме „multiplex“ (накопление) (100 сканов на энергетическое окно) для яркого „бугорка“ (точка *2*) детектируется не только кремний Si(LLV), но и цинк Zn(LMM), и O(KLL), а также Cl, K и загрязнения C. В ярком „бугорке“ (точка *2*) содержание кремния гораздо меньше, но наблюдается повышенное содержание Zn и O, а также значительное содержание загрязнения углеродом C.

На рис. 4, *a* представлено РЭМ-ВЭ изображение поверхности дна кратера на глубине 58 нм, на котором видны преципитаты (светлые пятна) размером от 200 до 500 нм. При сканировании электронным пучком по поверхности изображение изменяется — материал из преципитатов начинает „расползаться“ под

действием пучка электронов (артефакт эксперимента). На рис. 4, *b–d* представлены соответствующие этому РЭМ-ВЭ изображению карты распределения следующих элементов: Si (*b*), O (*c*) и Zn (*d*) в оже-электронах. Из-за „расползания“ преципитатов под действием электронного пучка карта Zn в оже-электронах не очень четкая, поскольку ее регистрировали в последнюю очередь после карты O. Анализ этих карт показывает, что преципитаты размером порядка сотен нм состоят из цинка Zn и кислорода (O). В карте распределения Si на месте этих преципитатов видны черные пятна, показывающие, что Si в этих местах нет. Это указывает на то, что упомянутые преципитаты включают в себя цинк и кислород, т.е. они состоят из окиси цинка ZnO.

В итоге следует сказать, что после имплантации Zn и O преципитаты состоят из оксида цинка ZnO с тем или иным соотношением между этими элементами, а именно наблюдаются только цинк Zn(LMM) — 994 эВ и кислород O(KLL) — 513 эВ, а также загрязнения углеродом C(KLL) — 272 эВ.

**3.2.2. Оже-спектры имплантированного образца Si после отжига в инертной среде Ar.** На рис. 5 представлены РЭМ-ВЭ изображения поверхности кратера травления: малое увеличение (*a*) и большое увеличение для области *1* (*b*). На изображении кратера ионного травления видны более темные области с пониженным содержанием примеси, отмеченные стрелками. Область *1* находится на глубине 20 нм, а область *2* — вблизи поверхности образца на глубине 5 нм. На рис. 5, *b* на РЭМ-ВЭ изображении прямоугольной области *1* указаны точки регистрации оже-спектров в режиме накопления. На рис. 6 приведены эти оже-спектры, полученные в точках *1*, *2* и *3* на рис. 5, *b* в режиме „multiplex“ (накопление) (по 100 сканов на энергетическое окно). В таблице приведено относительное содержание в ат% элементов Si, Zn, O и C (загрязнения) для трех точек

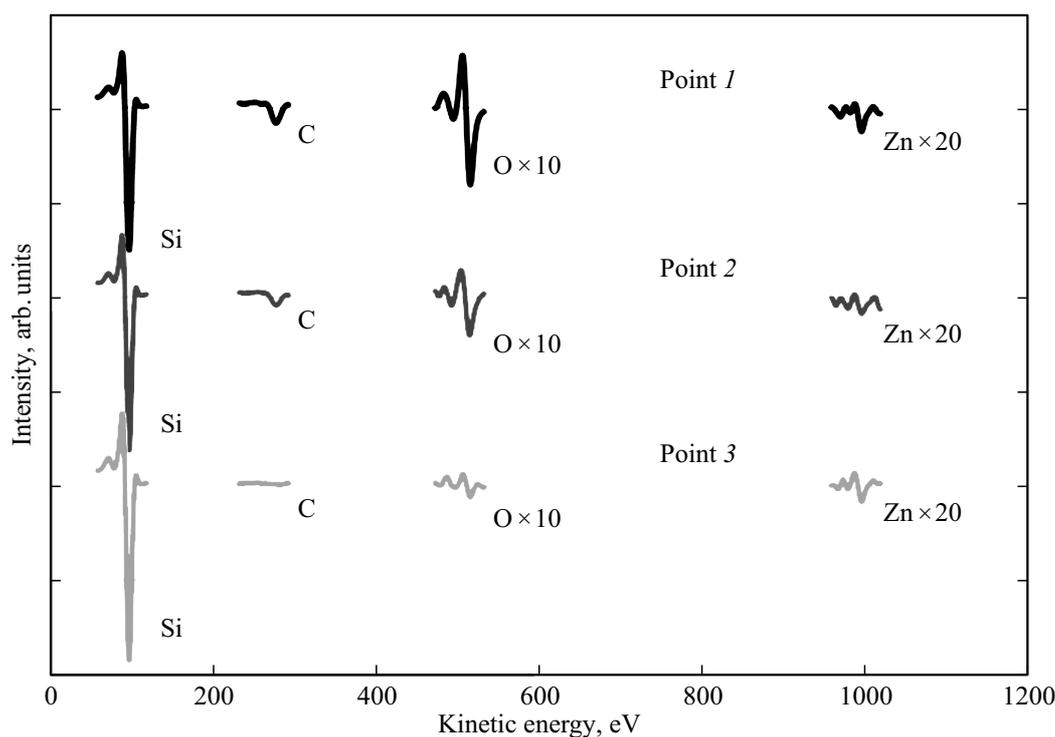


Рис. 6. Оже-спектры, полученные в точках, указанных на рис. 5, *b*.

на рис. 5, *b*. Из этих спектров следует, что и после отжига имплантированных образцов преципитаты состоят из кремния (Si), цинка (Zn) и кислорода (O) с загрязнениями углеродом (C). Однако теперь в этих преципитатах наблюдается повышенное содержание Si, что может указывать на то, что после высокотемпературного отжига преципитаты могут состоять не только из оксида цинка ZnO, а возможно, и виллемита Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. Иначе говоря, в процессе отжига в инертной среде Ar при высоких температурах в реакцию взаимодействия с ZnO вступают как атомы Si матрицы, так и имплантированный кислород, а также, возможно, и растворенный кислород из подложки кремния, выращенного по методу Чохральского, по реакции



или



Таким образом, на внешней границе наночастицы вокруг ядра из ZnO происходит образование оболочки из

Относительное содержание элементов

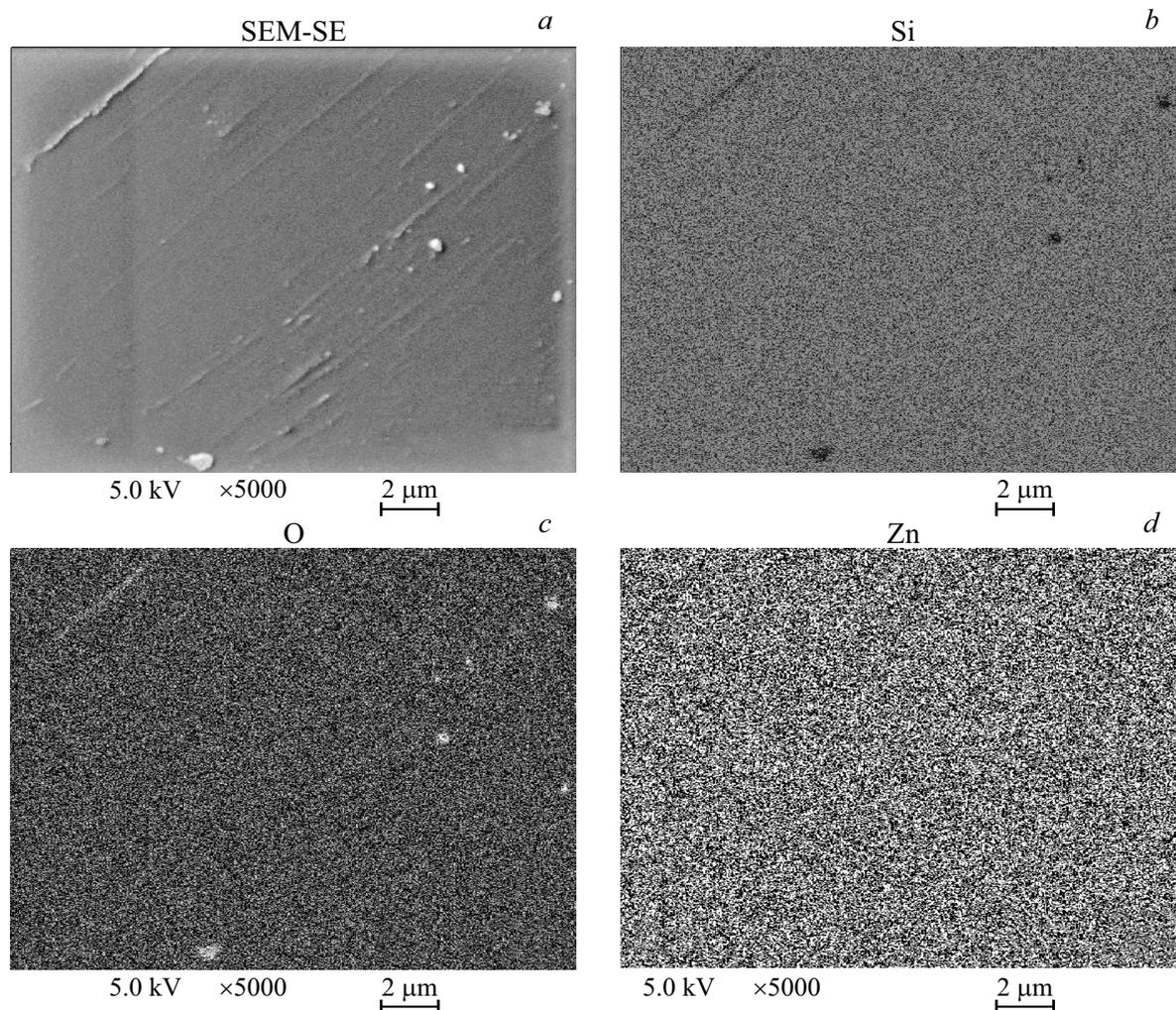
| Элемент | Si, ат% | O, ат% | Zn, ат% | C, ат% |
|---------|---------|--------|---------|--------|
| Точка 1 | 84.59   | 5.55   | 0.59    | 9.27   |
| Точка 2 | 91.16   | 2.78   | 0.40    | 5.66   |
| Точка 3 | 97.77   | 0.89   | 0.59    | 0.75   |

Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. В таблице приведены относительные концентрации максимумов в ат% для детектируемых элементов в точках 1, 2 и 3 на рис. 5, *b*.

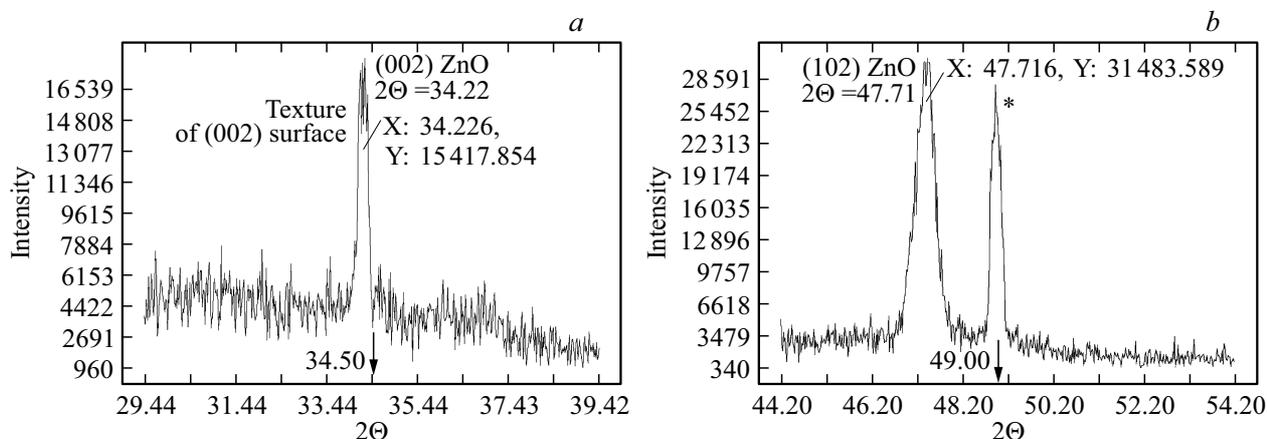
На рис. 7, *a* представлены РЭМ-ВЭ изображение поверхности кратера травления на глубине 20 нм (область 1 на рис. 5, *a*) и соответствующие этому изображению карты распределения элементов Si (*b*), O (*c*) и Zn (*d*) в оже-электронах. На рис. 7, *a* на РЭМ-ВЭ изображении в топологическом контрасте видны светлые точки размером порядка нескольких сотен нм, которые свидетельствуют о наличии „бугорков“-преципитатов на исследуемой поверхности. На рис. 7, *b* на карте Si в оже-электронах этим светлым точкам соответствуют темные точки, что означает отсутствие в этих местах атомов Si. На рис. 7, *c* на карте для O в местах светлых точек на рис. 7, *a* находятся также светлые точки, что отвечает наличию в них кислорода. К сожалению, на карте в оже-электронах для Zn, которая исследуется в конце измерений после кислорода, изображение не детектируется из-за размытия (в отличие от рис. 4, *d*).

Для области 2, находящейся вблизи поверхности образца на глубине 5 нм, из данных РЭМ-ВЭ изображения (топологический контраст) (*a*) и соответствующих карт распределения элементов Si, O и Zn в оже-электронах получаются результаты, примерно аналогичные вышеприведенным для области 1 (не показаны для краткости).

Таким образом, из визуализации поверхности дна кратера на глубине 20 нм в режиме РЭМ-ВЭ и соответствующих карт в оже-электронах для элементов Si, O



**Рис. 7.** РЭМ-ВЭ изображение поверхности образца для области I на глубине 20 нм (a) и соответствующие карты распределения в оже-электронах для элементов Si (85 эВ) (b), O (513 эВ) (c) и Zn (994 эВ) (d).



**Рис. 8.** Дифрактограммы текстурированной поверхности ZnO(002) (a) и плоскостей ZnO(102) при смещении тормозного пика (положения трубки) в сторону больших углов дифракции для образца, отожженного при 800°C в аргоне (b). Стрелками показано угловое положение трубки. Звездочкой показан тормозной пик, соответствующий угловому положению рентгеновской трубки.

и Zn следует, что преципитаты размером порядка сотен нм состоят в основном из оксида цинка ZnO. Однако не исключена вероятность, что некоторые из них могут иметь и структуру ZnO–Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>.

### 3.3. Рентгено-фазовые дифракционные исследования

**3.3.1. Рентгеновская дифракция образца Si после имплантации ионами Zn<sup>+</sup> и O<sup>+</sup>.** Результаты РФА образцов показаны на рис. 8. Они позволяют определить фазовый состав кристаллических преципитатов. Кривая дифракции содержит пики, обусловленные текстурой ZnO(002) с углом дифракции 34.22°. Это подтверждает тот факт, что после имплантации Si ионами Zn<sup>+</sup> и O<sup>+</sup> в образцах образуются преципитаты ZnO. На дифрактограмме также проявляется пик рентгеновского тормозного излучения при угле 34.50°, который соответствует угловому положению рентгеновской трубки. На дифрактограммах также проявляется рентгеновский пик подложки кремния Si(004) (для краткости не показан).

**3.3.2. Рентгеновская дифракция образца Si после отжига в нейтральной среде Ag.** На рис. 8, b представлена дифрактограмма имплантированного образца после отжига в среде Ag при температуре 700°C в течение 1 ч. Кривая дифракции содержит пик, обусловленный фазой ZnO(102) с углом дифракции 47.21°. Это подтверждает тот факт, что после отжига в образцах формируются кристаллические преципитаты ZnO. По формуле Дебая-Шеррера (Debye-Scherrer)

$$L = \frac{0.94\lambda}{\beta(2\theta) \cos \theta},$$

где  $\lambda = 0.154$  нм,  $\beta(2\theta) = 0.52^\circ$  — ширина линии на половине высоты (FWHM),  $\theta = 14.32^\circ$  — брэгговский угол, были определены размеры кристаллитов. Согласно расчету по вышеприведенной формуле, размер кристаллитов ZnO составляет  $L = 5$  нм. На дифрактограмме также проявляется „паразитный“ пик рентгеновского тормозного излучения при угле 49.00°, который соответствуют угловому положению рентгеновской трубки.

## 4. Заключение

1. После имплантации ионов Zn и O в Si-подложку распределения Zn, O и оксидных соединений имеют максимум при 70 нм, причем оксидные соединения имеют дополнительный максимум при 10 нм связанный с сегрегацией на границе раздела углеродная пленка–кремниевая подложка.

2. После имплантации на глубине 58 нм визуализированы преципитаты размером порядка сотен нм.

3. После имплантации в приповерхностном слое Si происходит образование текстуры ZnO(002).

4. После отжига в срезе Ag при температуре 800°C примесь Zn диффундирует в глубь подложки и к поверхности образца и имеет два максимума: один — на глубине 150 нм, а другой — на глубине 5 нм.

5. После отжига примесь O диффундирует к поверхности образца и имеет максимум вблизи поверхности на глубине 5 нм, а профили оксидных соединений ZnO, SiO<sub>2</sub> и SiO повторяют профиль кислорода.

6. После отжига на глубине 20 нм зафиксированы преципитаты состава ZnO размером порядка сотен нм.

7. После отжига при 800°C в срезе Ag в Si установлено наличие кристаллических наночастиц ZnO(102) размером около 5 нм.

Часть исследований была выполнена на оборудовании ЦКП „МСТ и ЭКБ“ МИЭТ.

## Список литературы

- [1] C.W. Litton, N.C. Collins, D.S. Reynolds. *Zinc Oxide Material for Electronic and Opto- electronics Device Application* (Wiley, Chichester, 2011).
- [2] S.-P. Chang, K.-J. Chen. *J. Nanomater.*, **2012**, 602398 (2012).
- [3] C. Jiang, X. Sun, G. Lo, D.L. Kwong, J.X. Wang. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 263501 (2007).
- [4] C. Li, Y. Yang, X. Sun, W. Lei, X.B. Zhang. *Nanotechnology*, **18**, 135604 (2007).
- [5] S. Chu, M. Olmedo, Zh. Yang, I. Kong, J. Lin. *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 181106 (2008).
- [6] G.P. Smestad, M. Gratzel. *J. Chem. Educ.*, **75**, 752 (1998).
- [7] Ch. Li, G. Beirne, G. Kamita, G. Lakhwani, J. Wang, N.C. Greenham. *J. Appl. Phys.*, **116**, 114501 (2014).
- [8] I. Muntele, P. Thevenard, C. Muntele, B. Chhay, D. Ila. *Mater. Res. Symp. Proc.*, **829**, B.2.21 (2005).
- [9] C. Liu, H. Zhao, Y. Shen, G. Jia, J. Wang, X. Mu. *Nucl. Instrum. Meth. B*, **326**, 23 (2014).
- [10] V. Privezentsev, N. Tabachkova, Yu. Lebedinskii. *AIP Conf. Proc.*, **1583**, 109 (2014).
- [11] V.V. Privezentsev, E.P. Kirilenko, A.N. Goryachev, A.V. Lutzau. *Proc. 23th Intern. Symp. on Nanostructures (NANO 2015)* (SPb Academic University, Russia, 2015) p. 109.
- [12] J.F. Ziegler, J.P. Biersack. *SRIM 2008* (<http://www.srim.org>).
- [13] *The NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy Database. Version 4.1.* <http://srdata.nist.gov/xps>.

Редактор А.Н. Смирнов

## Formation of precipitates in Si implanted with $^{64}\text{Zn}^+$ and $^{16}\text{O}^+$ ions

V.V. Privezentsev<sup>1</sup>, E.P. Kirilenko<sup>2</sup>, A.V. Goryachev<sup>2</sup>,  
A.V. Lutzau<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics and Technology,  
Russian Academy of Sciences,  
117218 Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Reseacher University  
of Electronic Technology,  
124498 Moscow, Zelenograd, Russia

<sup>3</sup> JSC NPP „Pulsar“,  
105187 Moscow, Russia

**Abstract** The results of the study of the silicon surface layer and the formation of precipitates in a CZ *n*-Si samples (100) sequentially implanted at room temperature by  $^{64}\text{Zn}^+$  ions with a dose of  $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  with an energy of 100 keV and ion  $^{16}\text{O}^+$  with the same dose, but with an energy of 33 keV so, that their projection ranges were  $R_p = 70 \text{ nm}$ . After implantation samples for isochronous 1 hour were annealed in Ar inert atmosphere in the temperature range of 400–900°C with a step of 100°C. The profiles of the implanted impurities were investigated by time-of-flight secondary ion mass spectrometry. Visualization of Si surface was conducted by a scanning electron microscope and the near-surface layer with depth profiling was studied by element mapping using Auger electron spectroscopy. After Zn and O ion implantation in the amorphized Si near-surface layer is formed ZnO(002) texture. After annealing in Ar at a temperature of 700°C in the recrystallized monocrystalline Si layer the ZnO(102) crystallites with a size of 5 nm were detected.