

Изменение структуры и свойств приповерхностного слоя Si, имплантированного Zn, в зависимости от флюенса облучения ионами $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 167 МэВ

© В.В. Привезенцев¹, В.С. Куликаускас², В.А. Скуратов³, О.С. Зилова⁴,
А.А. Бурмистров⁴, М.Ю. Пресняков⁵, А.В. Горячев⁶

¹ Физико-технологический институт Российской академии наук,
117218 Москва, Россия

² НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия

³ Объединенный институт ядерных исследований,
141520 Дубна, Московская обл., Россия

⁴ Национальный исследовательский университет „МЭИ“,
111250 Москва, Россия

⁵ Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия

⁶ ООО „Си Эн Эл Девайсез“,
124432 Зеленоград, Москва, Россия

E-mail: privezentsev@ftian.ru; v.privezentsev@mail.ru

(Получена 4 сентября 2018 г. Принята к печати 10 сентября 2018 г.)

Подложки монокристаллического *n*-Si с ориентацией (100) были имплантированы ионами $^{64}\text{Zn}^+$ с дозой $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и энергией 50 кэВ. Затем образцы подвергались облучению при комнатной температуре ионами $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 167 МэВ в диапазоне флюенсов от $1 \cdot 10^{12}$ до $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Визуализация поверхности и поперечного сечения образцов проводилась с помощью растровой электронной микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии. Распределение имплантированного цинка и его оксида исследовалось методом времяпролетной вторично-ионной масс. После облучения Хе на поверхности образца обнаружены кластеры, состоящие из смеси Zn-ZnO, и поверхностные поры. В подповерхностном слое аморфизованного кремния зафиксированы фазы цинка и его оксида. После облучения Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ кластеры цинка или его оксида используемыми методами исследований в образцах не обнаружены.

DOI: 10.21883/FTP.2019.03.47284.8979

1. Введение

Свойства металлических наночастиц (НЧ) всесторонне исследуются из-за их возможного применения в современных опто- и микроэлектронных устройствах [1]. В частности, НЧ из металлического цинка могут использоваться в УФ-фотодетекторах, работа которых основана на явлении поверхностного плазмонного резонанса. Существует ряд попыток формирования НЧ из металлического цинка путем пересыщения кремния этим металлом методом ионной имплантации [2–4]. В последние годы большое внимание было уделено проблемам создания приборов для микроэлектроники и фотоники, сопряженных с кремниевой подложкой. Так как кремний не является прямозонным материалом, он не может быть удобным материалом для целей создания излучательных устройств. Поэтому важной задачей является поиск способов синтеза НЧ из прямозонного материала типа с высоким выходом люминесценции. Для этих целей подходит, в частности, оксид цинка, так как последний является прямозонным материалом с большой энергией связи электрона и дырки в экситоне — 60 мэВ. Кроме того, НЧ ZnO должны синтезироваться с узким распределением по размеру, при котором ширина линии излучения экситонной люминесценции сужается. В работе [5] был

предложен новый метод избирательного изменения и контроля размеров сформированных НЧ путем облучения подложки пучками быстрых тяжелых ионов (БТИ). Облучение БТИ приводит к образованию так называемых деформационных латентных треков (неупорядоченных областей нанометрового размера вокруг траектории иона) во многих оксидных и полупроводниковых кристаллах. Соответствующее облучение, создающее трек, может вызвать изменение формы НЧ от сферической до эллипсоидальной. Этот эффект наиболее заметен при наличии множественных (около 100 раз) воздействий БТИ [6]. В настоящей работе в Si были синтезированы наночастицы Zn с помощью ионной имплантации с высокой дозой и низкой энергией ионов цинка [4]. Затем была выполнена модификация имплантированных образцов с помощью облучения высокоэнергетическими ионами Хе.

2. Образцы и методика эксперимента

Монокристаллические подложки Si с ориентацией (100) были имплантированы ионами $^{64}\text{Zn}^+$ с дозой $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и энергией 50 кэВ. Чтобы избежать значительного нагрева подложки при имплантации плотность тока ионного пучка составляла $j \leq 0.5 \text{ мкА/см}^2$. Затем

образцы облучались ионами Хе с энергией 167 МэВ и флюенсами в диапазоне $1 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ на циклотроне У-400. Циклотрон имел специализированный ионный канал для облучения материалов тяжелыми ионами с системами вертикального и горизонтального сканирования ионного пучка и устройствами мониторинга и диагностики ионных пучков. Согласно программе SRIM [6], проекционный пробег ионов Хе в Si при использованных параметрах облучения составляет $R_p = 20 \text{ мкм}$. Известно, что облучение быстрыми ионами Хе приводит к образованию в Si латентных аморфных областей (кластеров) цилиндрической формы, направление которых параллельно ориентации пучка ионов Хе [7, 8].

Топологию поверхности образцов исследовали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) MIRA3 (TESCAN) в режимах вторичной эмиссии (ВЭ) электронов и обратных рассеянных электронов (ОРЭ) (в англоязычной литературе BSE). В последнем режиме мы можем получать так называемое Z-контрастное изображение, которое дает нам информацию (в весовом соотношении) об элементах на изображении. Дополнительно количественный состав поверхности образцов исследовался с помощью энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС), так как соответствующая приставка входила в состав используемого РЭМ. В обоих случаях используется детектор In-beam. Здесь надо отметить, что технология торможения луча (ТПП) предназначена для максимального разрешения при низких энергиях электронного пучка. В ТТМ энергия электронов в пучке уменьшается до того, как они воздействуют на поверхность образца с помощью отрицательного напряжения смещения, которое подается на образец. Достижимы сверхнизкие уровни энергии от 50 эВ вплоть до 0 эВ при ручном регулировании. ТПП повышает эксплуатационные качества электронной колонны за счет уменьшения оптических aberrаций, что позволяет различать пятна с небольшими размерами и получать изображения с высоким разрешением при низких энергиях. В этом режиме достигается предельное разрешение к особенностям поверхности и выступающего топографического и элементного контраста при низких энергиях пучка и максимальной чувствительности. ТПП включает в себя систему для отрицательного смещения напряжения на держателе образца и детектор In-beam, который работает либо как детектор ВЭ в режиме торможения пучка (ТПП), либо как детектор ОРЭ в стандартном режиме BSE.

Визуализация поперечного сечения приповерхностного слоя проводилась с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Titan 80-300 (FEI). С помощью фокусированных ионных пучков (ФИП) были подготовлены образцы в виде прозрачной для электронов мембраны с поперечными размерами $14 \times 8 \text{ мкм}$ и толщиной 10–50 нм. Используя приставку для ЭДС, прилагаемую к микроскопу, можно анализировать стехиометрический состав полученных после имплантации и высокоэнергетического облучения слоев. ПЭМ-изображения были получены с использованием двух методов

обнаружения рассеянных электронов: 1) светлое поле с записью электронов, рассеянных под малыми углами. Этот метод записи позволил получить данные о строении и составе приповерхностного слоя, а также проанализировать его фазовую структуру, используя прямую визуализацию кристаллической решетки; 2) метод детектирования электронов, упругорассеянных из атомов кристаллической решетки под большими углами, с использованием высокоуглового кольцевого датчика темного поля (в англоязычной литературе HAADF). В этом случае изображения имеют значительный Z-контраст (по массе элемента), что позволило определить структурные элементы путем прямой визуализации и анализа преобразований Фурье для изображений атомной структуры.

Концентрационные профили исследовались на времяпролетном вторично-ионном масс-спектрометре (ВП ВИМС) TOF.SIMS-5 (IonTOF GmbH). Этот анализ осуществлялся при следующих условиях: травление кратера проводилось ионами цезия Cs^+ (для анализа отрицательных ионов O, Si, Zn, ZnO, SiO, SiO₂) и ионами кислорода O_2^+ (для анализа положительных ионов O, Si, Zn) с энергией 1 кэВ, размер раstra $300 \times 300 \text{ мкм}$. Анализирующий пучок ионов Bi имел следующие параметры: энергия была 30 кэВ, ток ионного пучка $i = 1.47 \text{ пА}$, размер анализируемого раstra $100 \times 100 \text{ мкм}$.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Имплантация цинком. РЭМ-исследования

После имплантации Zn поверхность Si образца сглаживается по сравнению с исходной подложкой, что является общеизвестным фактом. На рис. 1 представлены изображения поверхности образца после имплантации Zn, исследованные с помощью РЭМ в режимах ВЭ (а) (топологический контраст) и ОРЭ (б) Z-контраст. Из сравнения этих двух рисунков следует, что на поверхности кремния находятся светлые пятна (бугорки), являющиеся Zn-содержащими частицами, и кратеры размером $\sim 10 \text{ нм}$, а также загрязнения углеродом. Последнее подтверждается ЭДС анализом приповерхностного слоя. Исследований поперечных сечений приповерхностного слоя образцов методом ПЭМ показали [4], что после имплантации образовались НЧ аморфного Zn со средним размером $\sim 4 \text{ нм}$ [1] на глубине $\sim 40 \text{ нм}$, что, согласно программе SRIM [6], соответствует проекционному пробегу ионов Zn в Si при использованной энергии имплантации. ЭДС микроанализ показал (см. рис. 1, с и табл. 1), что кроме основных элементов подложки, а именно, кремния и кислорода (растворенного неактивного в кремнии, выращенного по методу Чохральского), имеются также примеси имплантированного цинка, а также углеродные загрязнения. Из этих данных можно сделать предположительный вывод о том, что наблюдаемые НЧ состоят из металлического Zn, его оксида ZnO или их смеси.

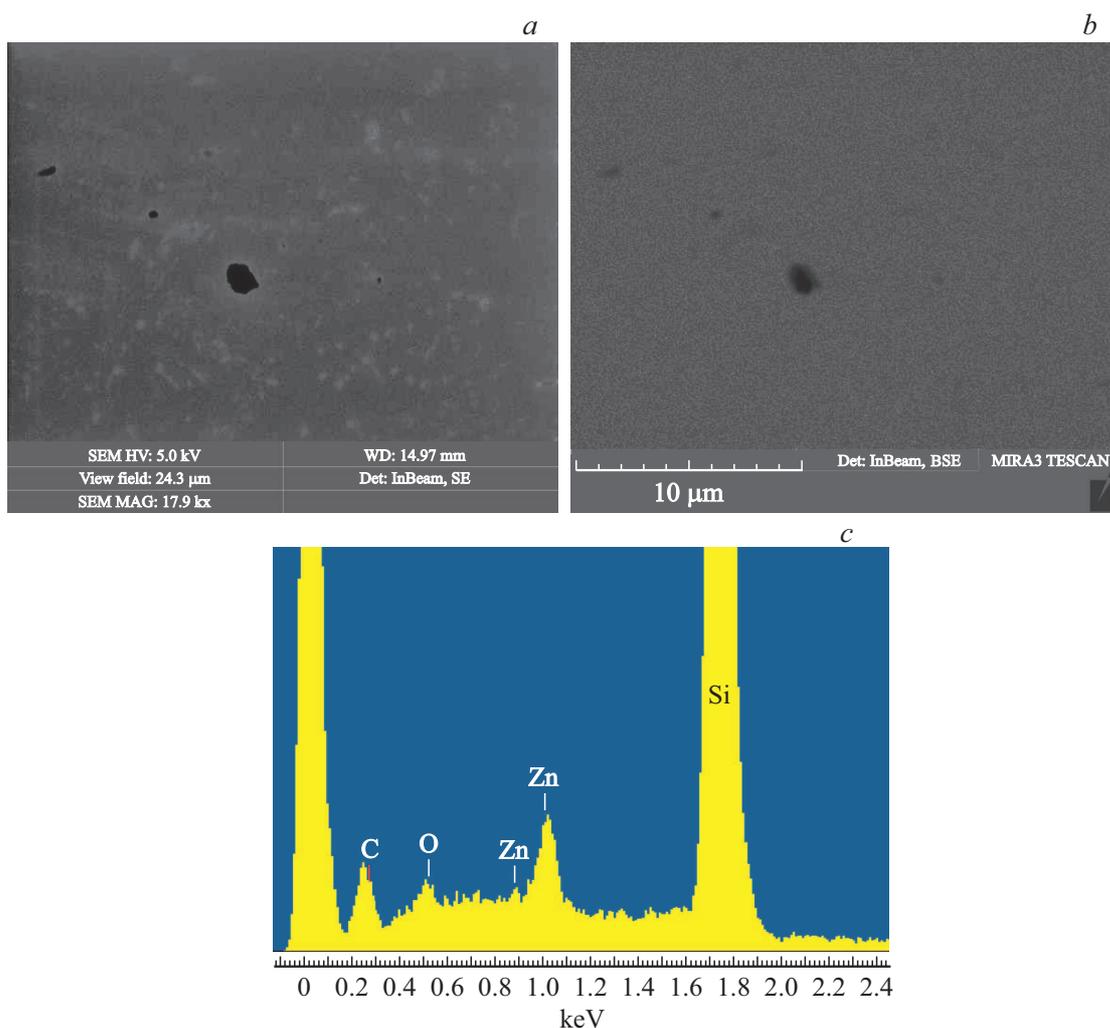


Рис. 1. РЭМ-ВЭ (а) и РЭМ-ОРЭ (b) изображения поверхности образца кремния после имплантации Zn и ЭДС-спектр по кадру (с).

Таблица 1. Имплантация Zn. РЭМ. ЭДС-микроанализ

Элемент	Содержание	
	вес %	ат %
C-K α	13.41	26.80
O-K α	1.08	1.62
Si-K α	83.23	71.11
Zn-K α	2.19	0.44
Всего	100.00	100.00

3.2. Облучение быстрыми ионами Хе

3.2.1. РЭМ-исследования. На рис. 2 представлены РЭМ-изображения топологии поверхности после облучения Хе с флюенсом $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ в режимах ВЭ (а) и ОРЭ (b), причем увеличение в них отличается на порядок. На рис. 1, а видно, что на поверхности образца наблюдаются бугорки (яркие пятна на РЭМ-ВЭ изображении), размеры которых доходят до нескольких мкм.

Они представляют собой Zn-содержащие частицы, поверхностные поры (темные пятна) и другие топологические дефекты, обусловленные радиационными повреждениями. Это следует из анализа РЭМ-ОРЭ изображения (Z-контраст) и ЭДС-спектра по этому кадру, приведенному на рис. 1, с. Из табл. 2 следует, что кроме основных элементов подложки, а именно кремния (линия Si-K) с содержанием 71.45 ат% и кислорода (линия O-K) с содержанием 1.9 ат%, имеются имплантированный Zn (линия Zn-K) с содержанием 0.44 ат%, а также углеродные загрязнения (линия C-K) с содержанием 26.2 ат%.

На рис. 3 представлены РЭМ-изображения топологии поверхности после облучения Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ в режимах ВЭ (а) и ОРЭ (b). На рис. 3, а видно, что на поверхности образца наблюдаются бугорки (яркие пятна на РЭМ-ВЭ изображении) и темные пятна — поверхностные поры, размеры которых составляют около 100 нм. Как следует из рис. 2, b (Z-контраст), светлые пятна представляют собой Zn-содержащие НЧ, а темные пятна имеют фон подложки, т. е. они являются

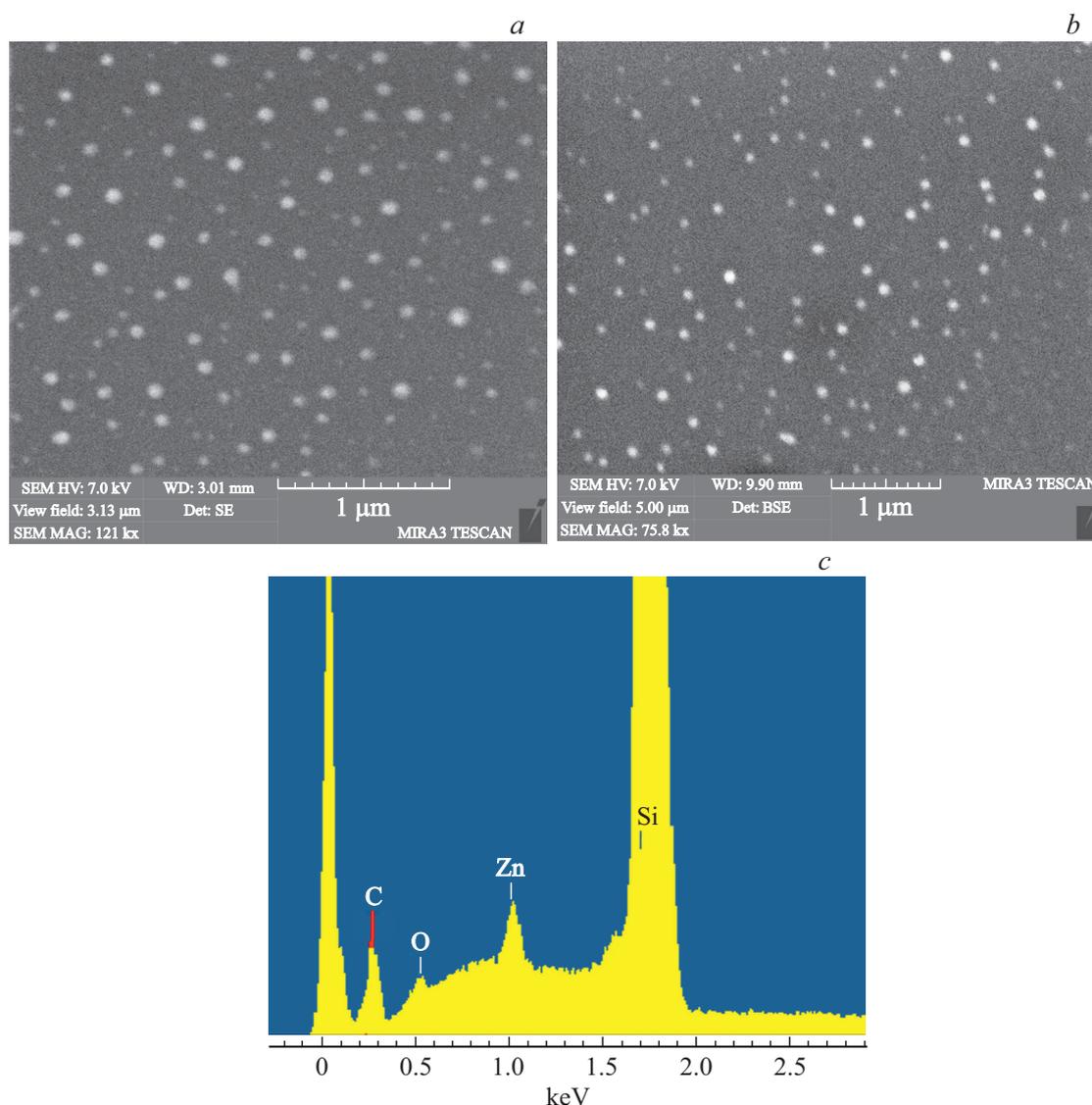


Рис. 2. РЭМ-изображение поверхности после облучения Хе с флюенсом $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$: *a* — режим ВЭ, *b* — режим ОРЭ и *c* — ЭДС-спектр по этому кадру.

поверхностными порами (темные пятна) и другие топологические дефекты, обусловленные радиационными повреждениями. Это следует и из анализа ЭДС-спектра по этому кадру, приведенному на рис. 3, *c* (см. табл. 3).

Таблица 2. Облучение Хе: $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. РЭМ. ЭДС-микрo-анализ

Элемент	Содержание	
	вес %	ат %
C- K_{α}	6.05	13.21
O- K_{α}	0.55	0.91
Si- K_{α}	90.83	84.85
Zn- K_{α}	2.57	1.03
Всего	100.00	100.00

3.2.2. ПЭМ-исследования. На рис. 4 представлено ПЭМ-изображение поперечного сечения кремния, имплантированного Zn, после облучения Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. На рис. 4, *a* представлено панорамное

Таблица 3. Облучение Хе: $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. РЭМ. ЭДС-микрo-анализ

Элемент	Содержание	
	вес %	ат %
C- K_{α}	4.60	10.23
O- K_{α}	0.62	1.03
Si- K_{α}	92.00	87.60
Zn- K_{α}	2.78	1.14
Всего	100.00	100.00

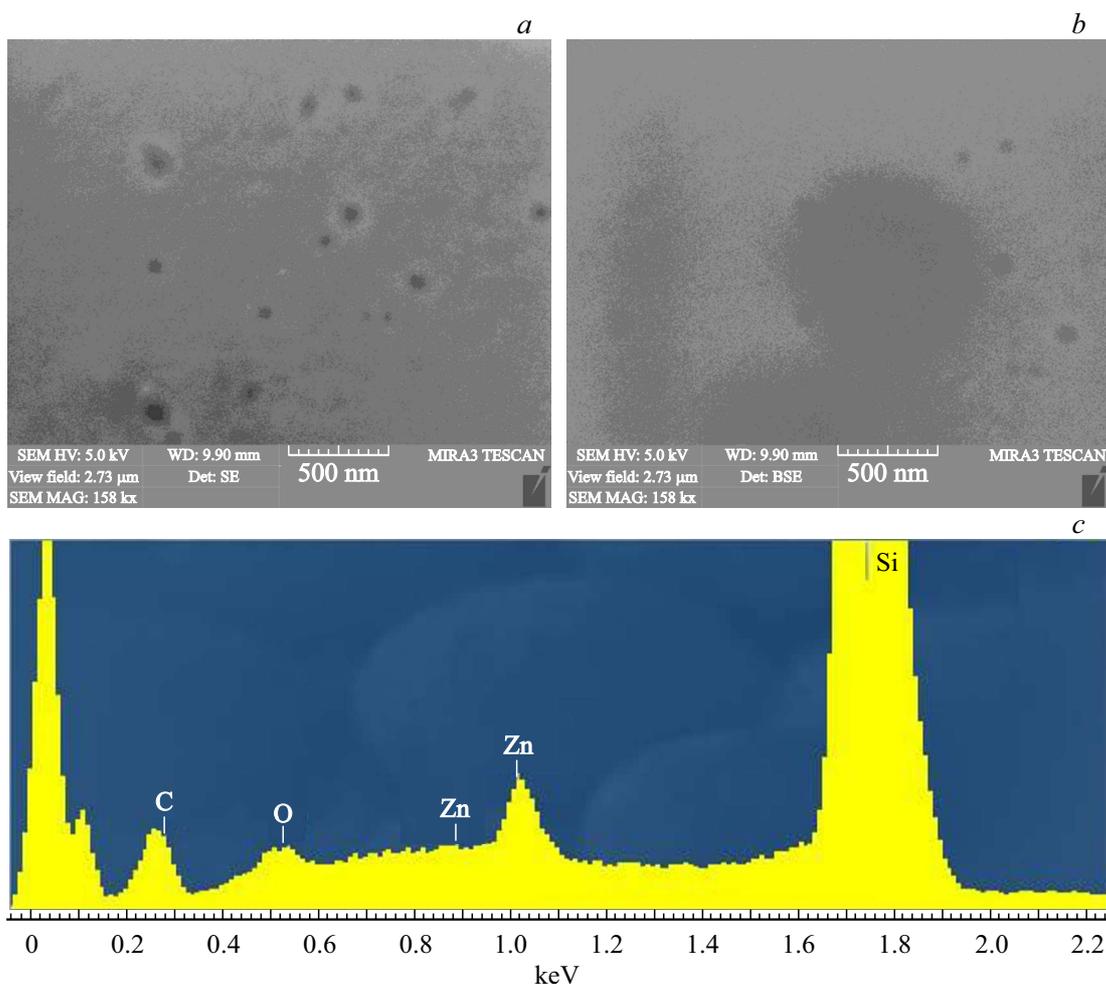


Рис. 3. РЭМ-ВЭ (a) и РЭМ-ОРЭ (b) изображения поверхности кремния, имплантированного Zn, после облучения Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и ЭДС-спектр по кадру (c).

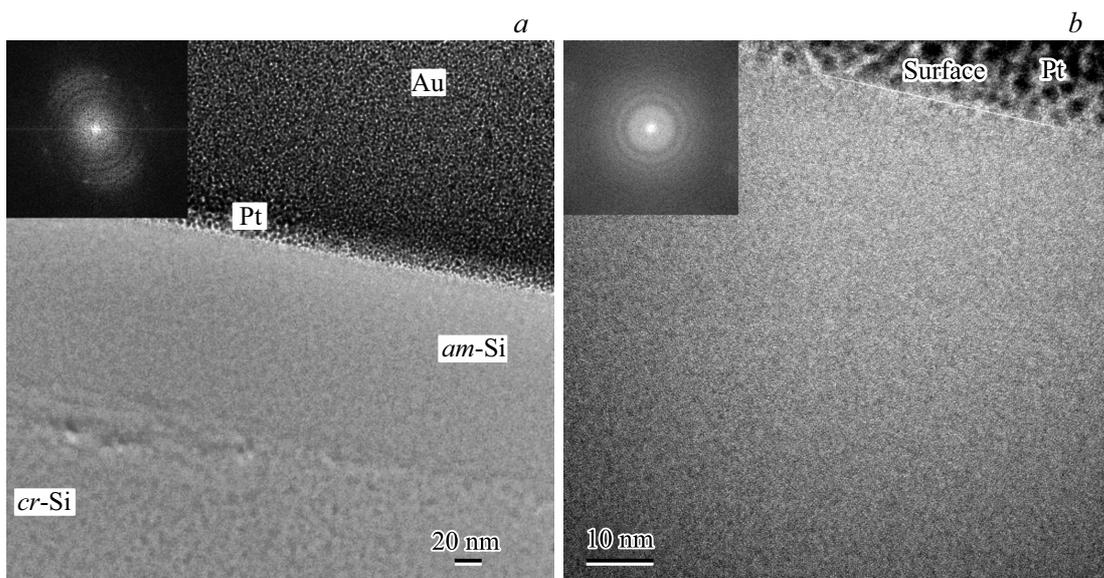


Рис. 4. ПЭМ-изображение приповерхностного слоя кремния после облучения Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$: a — обзорное изображение, на вставке представлен фурье-образ для нарушенной кремниевой подложки; b — ПЭМ ВР изображение аморфизованного слоя кремния, на вставке представлен фурье-образ для этого слоя.

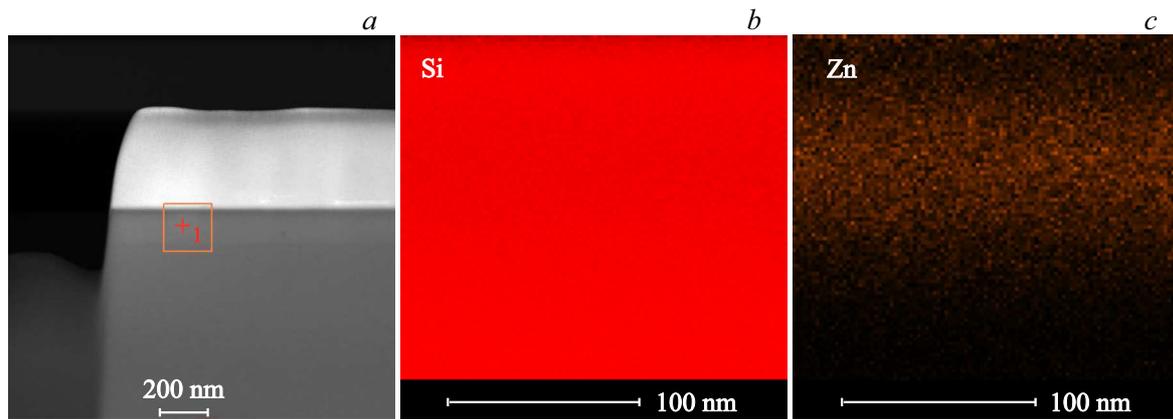


Рис. 5. ПЭМ-изображения сечения приповерхностного слоя кремния, имплантированного Zn, после облучения Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; *a* — обзорное изображение, квадратом выделена область ЭДС анализа; *b* — карта распределения Si по выделенному квадрату на рис. 5, *a*; *c* — карта распределения Zn по выделенному квадрату на рис. 5, *a*.

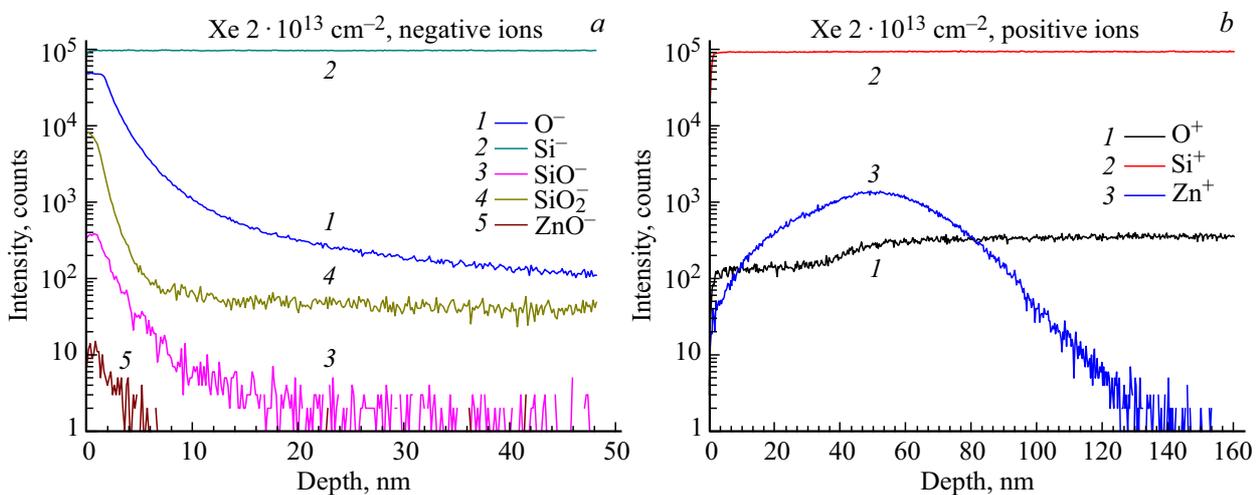


Рис. 6. ВП ВИМС-профили кремния, имплантированного Zn, после облучения Хе с флюенсом $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$: отрицательные ионы (*a*) и положительные ионы (*b*).

ПЭМ-изображение, включающее в себя верхний слой напыленного золота и платины. Это артефакты приготовления образцов с помощью ФИПов. Ниже этого слоя расположен собственно аморфизованный слой кремния, а под ним — нарушенный кристаллический слой кремниевой подложки. На вставке этого рисунка представлен фурье-образ для кристаллической подложки, представляющий собой рефлексы, подтверждающие кристаллический характер этого слоя, на фоне гало. Последнее свидетельствует о некоторой степени аморфизации указанного слоя. На рис. 4, *b* представлен аморфизованный слой кремния. Анализ этого изображения показывает, что в результате облучения Хе происходит дробление аморфных НЧ. На вставке рисунка представлен образ Фурье для этой области (содержащий цинк), представляющий собой гало, что подтверждает аморфное состояние этого слоя.

На рис. 5, *a* представлено обзорное ПЭМ-изображение сечения приповерхностного слоя кремния после об-

лучения Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. На нем выделен квадрат, по которому проведен ЭДС-микроанализ и построены карты распределения Si (матрица) и Zn (имплантированная примесь). На рис. 5, *b* видно, что сигнал от кремния немного уменьшен в тонком приповерхностном слое, толщиной несколько нм. Обращаем внимание на то, что выделенный квадрат немного затрагивает и напыленный на кремнии слой Au и Pt. На рис. 5, *c* представлена карта распределения Zn. Хорошо видно, что цинк распределен в аморфизованном слое кремния от поверхности образца до $\sim 100 \text{ нм}$, причем его максимум расположен на глубине $\sim 50 \text{ нм}$.

На рис. 6 представлены ВП ВИМС-профили для образца после облучения Хе с флюенсом $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. На рис. 6, *a* представлены профили в отрицательных ионах для O, Si, SiO, SiO₂ и ZnO. Хорошо видно, что профиль для ионов Si⁻ (кривая 2) представляет собой прямую линию с едва различимым спадом у поверхности. Распределение соединений с кислородом можно

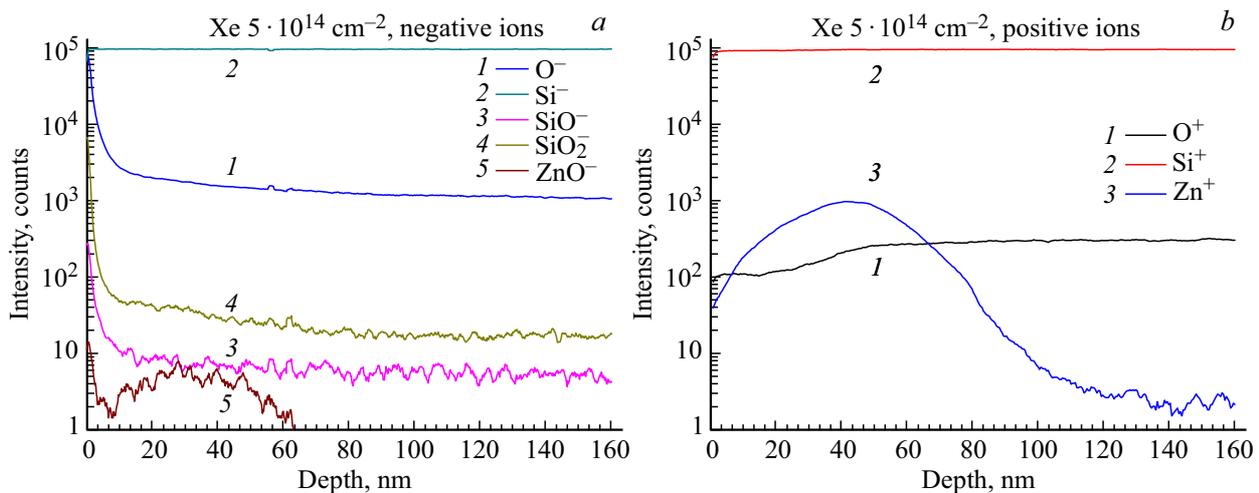


Рис. 7. ВП ВИМС-профили кремния, имплантированного Zn, после облучения Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$: отрицательные ионы (а) и положительные ионы (b).

анализировать только в отрицательных ионах. Профили для кислорода O^- и оксидов кремния SiO^- (кривая 3), SiO_2^- (кривая 4) представляют собой спадающие от поверхности кривые, причем у самой поверхности у них наблюдается небольшое плато до глубины 2 нм. В отрицательных ионах зарегистрирован профиль и для ZnO^- (кривая 5). Он наблюдается до глубины 6 нм и по интенсивности находится на уровне шумов. Углерод в нашем случае является загрязнением и смысловой нагрузки не несет, так как, по-видимому, он забился в глубь образца с поверхности при имплантации Zn или облучении Хе.

На рис. 6, b представлены профили в положительных ионах для элементов O, Si и Zn. Распределение для ионов Si^+ (кривая 2) представляет собой прямую линию с небольшим спадом у поверхности до глубины в несколько нм. Распределение кислорода в положительных ионах должно быть постоянным по интенсивности в однородной матрице. Наличие других элементов в виде примесей или соединений, а также изменение кристаллической структуры будут вызывать изменение коэффициентов выхода вторичных ионов, но концентрация кислорода в образце будет постоянной, так как кислород имплантируется во время травления образца при ВП ВИМС-анализе и окисляет поверхность образца. Концентрация привнесенного кислорода намного выше концентрации кислорода в образце, поэтому распределение кислорода в положительных ионах рассматривается только как показатель однородности матрицы. На рис. 6, b (кривая 1) видно, что распределение O^+ имеет спад до глубины ~ 100 нм из-за присутствия в приповерхностном слое образца тяжелой примеси цинка. Распределение самого цинка представляет собой колоколообразную кривую с максимумом, расположенным на глубине ~ 45 нм.

На рис. 7 представлены ВП ВИМС-профили для образца после облучения Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 7, a представлены профили в отрицательных ионах для O, Si, SiO , SiO_2 и ZnO. Характер всех профилей почти не изменился по сравнению с рис. 6, a для флюенса $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Только плато на профилях кислорода (кривая 1) и оксидов кремния SiO (кривая 3) и SiO_2 (кривая 4) пропали и спад интенсивности сигнала ВП ВИМС идет уже от самой поверхности. Однако есть и отличие: профиль оксида цинка (кривая 5) представляет собой кривую с максимумом, расположенным на глубине ~ 35 нм. Хорошо видно, что профиль для ионов Si^- (кривая 2) представляет собой прямую линию.

На рис. 7, b представлены профили в положительных ионах для элементов O, Si и Zn. Характер распределения всех профилей почти не изменился по сравнению с рис. 6, b. Распределение для ионов Si^+ (кривая 2) представляет собой прямую линию. На рис. 7, b (кривая 1) видно, что распределение O^+ опять же имеет спад до глубины ~ 100 нм из-за присутствия в приповерхностном слое образца тяжелой примеси цинка. Распределение самого Zn представляет собой кривую с максимумом, расположенным на глубине 50 нм, причем все распределение цинка несколько сместилось в глубь подложки.

4. Заключение

1) Из РЭМ-исследований следует, что на поверхности кремниевых подложек после облучения быстрыми ионами Хе с флюенсом $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ обнаружены Zn-содержащие кластеры и небольшие поверхностные поры малой глубины. Их размеры заключены в пределах от 100 нм до единиц мкм.

2) После облучения быстрыми ионами Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ на поверхности кремниевых подложек обнаружены кластеры, состоящие из смеси $\text{Zn} \cdot \text{ZnO}$, и кратеры малой глубины. Их размеры ~ 100 нм.

3) После облучения Хе с флюенсом $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ образец кроме основных элементов подложки, а именно кремния с содержанием 71.45 ат% и кислорода с содержанием 1.9 ат%, имеет также имплантированный Zn с содержанием 0.44 ат%, а также углеродные загрязнения с содержанием 26.2 ат%.

4) После облучения Хе с флюенсом $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ распределение цинка распространяется до 160 нм. После облучения Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ распределение цинка несколько смещается в глубь подложки. В обоих случаях в образце зафиксировано присутствие ионов ZnO^- , в первом случае в виде спадающей кривой от поверхности до глубины 6 нм, а во втором — в виде кривой с максимумом на глубине 35 нм.

5) После облучения Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ кластеры цинка или его оксида в аморфизованном слое кремния не зафиксированы, а наблюдается однородное распределение цинка по этому слою.

Работа частично выполнена в рамках государственной программы 14, проект № 0066-2018-0008.

Список литературы

- [1] *Functional Nanometer-Sized Clusters of Transition Metals: Synthesis, Properties and Applications* (RSC Smart Materials Series), ed. by W. Chen and S. Chen (Royal Society of Chemistry, 2014).
- [2] H. Amekura, Y. Takeda, N. Kishimoto. *Mater. Lett.*, **222**, 96 (2011).
- [3] Y.Y. Shen, X.D. Zhang, D.C. Zhang, Y.H. Xue, L.H. Zhang, C.L. Liu. *Mater. Lett.*, **65**, 2966 (2011).
- [4] V.V. Privezentsev, N.Yu. Tabachkova, K.B. Eidelman, S.V. Ksenich. *Bull. Rus. Acad. Sci.: Phys.*, **80**, 1421 (2016).
- [5] D. Zatsepin, A. Zatsepin, D. Boukhvalov, E. Kurmaev, Z. Pchelkina, Z. Gavrilov. *J. Non-Cryst. Solids*, **432**, 183 (2016).
- [6] J.F. Ziegler, J.P. Biersack. *SRIM 2013* (<http://www.srim.org>).
- [7] C. D'Orleans, J. Stoquert, C. Estourne's, C. Cerruti, J. Grob, J. Guille, F. Haas, D. Muller, M. Richard-Plouet. *Phys. Rev. B*, **67**, 220101R (2003). Erratum *Phys. Rev. B*, **68**, 029903 (2003).
- [8] F.F. Komarov, O.A. Milchanin, V.A. Skuratov, M.A. Mokhovikov, A. Janse Van Vuuren, J.N. Neethling, E. Wendler, L.A. Vlasukova, I.N. Parkhomenko, B.N. Yuvchenko. *Bull. Rus. Acad. Sci.: Phys.*, **80**, 141 (2016).

Редактор А.Н. Смирнов

Zn implanted Si near-surface layer structure and properties changing depending on the $^{132}\text{Xe}^{26+}$ — 167 MeV ion irradiation fluence

V.V. Privezentsev¹, V.S. Kulikauskas², V.A. Skuratov³, O.S. Zilova⁴, A.A. Burmistrov⁴, M.Yu. Presnyakov⁵, A.V. Goryachev⁶

¹ Institute of Physics and Technology, Russian Academy of Sciences, 117218 Moscow, Russia

² Skobeltsyn Institute of Nuclear Research, Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Russia

³ Joint Institute for Nuclear Research, 141520 Dubna, Moscow Distric, Russia

⁴ National Research University „MPEI“, 111250 Moscow, Russia

⁵ National Research Center „Kurchatov Institute“, 123182 Moscow, Russia

⁶ CNL Devices Ltd, 124432 Zelenograd, Moscow, Russia

Abstract Substrates of monocrystalline *n*-Si substrates with orientation (100) were implanted with $^{64}\text{Zn}^+$ ions with a dose of $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ and energy of 50 keV. Then the samples were irradiated at room temperature by $^{132}\text{Xe}^{26+}$ ions with energy of 167 MeV in the fluence range from $1 \cdot 10^{12}$ up to $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Visualization of the sample surface and cross section was carried out with the help of SEM and TEM. The distribution of implanted zinc was studied by the TOF-SIMS method. After Xe irradiation the NPs consisting of a mixture of Zn · ZnO and surface pores were found on the sample surface. In the amorphized silicon subsurface layer the zinc and its oxide are fixed. Radiation defects are detected in the underlying near-surface layer of crystalline silicon. In the samples the zinc or its oxide clusters are not revealed using the research methods.