

УДК 548.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНКИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННОЙ Zn И ОБЛУЧЕННОЙ БЫСТРЫМИ ИОНАМИ Xe

© 2019 г. В. В. Привезенцев^{1, 2, *}, А. Н. Палагушкин², В. А. Скуратов³,
В. С. Куликаускас⁴, В. В. Затекин⁴, О. С. Зилова⁵, А. В. Бурмистров⁵,
Д. А. Киселев⁶, Э. А. Штейнман⁷, А. Н. Терешенко⁷

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технологический институт имени К.А. Валиева Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное учреждение “Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук”, Москва, Россия

³Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

⁵Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

⁶Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Москва, Россия

⁷Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела
Российской академии наук, Черноголовка, Россия

*E-mail: v.privezentsev@mail.ru

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

После доработки 10.06.2019 г.

Принята к публикации 27.07.2019 г.

Исследовано влияние облучения быстрыми тяжелыми ионами Xe с энергией 167 МэВ на структуру и свойства пленки SiO₂, имплантированной Zn. Обнаружено, что после имплантации Zn в пленке SiO₂ на глубине около проективного пробега ионов цинка ($R_p \approx 40$ нм) образуются аморфные наночастицы цинка размером около 10 нм. Облучение пленок Xe приводит к гашению пика в спектре фотолюминесценции на длине волны 370 нм, обусловленного экситонной рекомбинацией, и к увеличению пика на длине волны 430 нм, связанного с радиационными дефектами. Поверхность пленки SiO₂ после обработки ионами Xe структурируется с образованием поверхностных кратеров, окружающих их бугорков–“хиллоков”, а также Zn-содержащих наночастиц.

DOI: 10.1134/S0367676519110206

ВВЕДЕНИЕ

Наночастицы (НЧ) Zn, сформированные в различных матрицах, могут найти применение в современной оптоэлектронике при создании УФ-детекторов, а НЧ его оксида, являющегося прямозонным материалом и обладающего большой энергией связи в экситоне (60 мэВ), могут найти применение в лазерах и электролюминесцентных дисплеях. ZnO применяется также в солнечных элементах, в газовых датчиках, приборах памяти (мемристорах), в приборах спинтроники, для медико-биологических целей и т.п. [1]. Формирование НЧ цинка в пленке SiO₂ можно осуществить с помощью ионного легирования Zn. Далее для получения фазы ZnO необходимо ис-

пользовать окисление [2, 3]. Можно проводить имплантацию ионов Zn и O с последующим отжигом в нейтрально-инертных средах [4]. Известно, что облучение быстрыми тяжелыми ионами (БТИ) приводит к образованию цилиндрических треков в подложке и удлинению формы НЧ в этой подложке в направлении облучения [5, 6]. В данной работе исследуется влияние облучения БТИ Xe на структуру и свойства пленки SiO₂, имплантированной Zn.

Среди вышеуказанных материалов матрицы с НЧ из ZnO играют особую роль, поскольку окись цинка является прямозонным материалом с шириной запрещенной зоны 3.37 эВ и имеет большую энергию связи электрона и дырки в эксито-

не 60 мэВ, которая позволяет получать УФ-излучение с длиной волны $\lambda = 390$ нм при температуре до 550°C . Поэтому матрицы с НЧ из ZnO смогут найти широкое применение в таких современных оптоэлектронных устройствах как УФ-лазеры и светодиоды [6]. Также перспективно их применение в солнечных элементах [7], электролюминесцентных дисплеях [8], в сенсорных газовых устройствах [9] и т.п.

НЧ из ZnO в кремниевой матрице могут быть сформированы термообработкой в инертно-окислительной среде Si, содержащего НЧ металлического Zn, которые могут быть получены методом ионного легирования Zn кремниевой подложки с последующим отжигом [10, 11]. Этот метод позволяет получать концентрации цинка в кремнии в максимуме нормального распределения до значения $N_{\text{Zn}} = 1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ (25 ат. %), что гораздо больше значения их предельной равновесной растворимости, которая составляет $N_{\text{Zn}}^{\text{lim}} = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [12] при температуре диффузии 1250°C .

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния облучения БТИ Хе на структуру и свойства пленки SiO_2 , имплантированной Zn.

После имплантации Zn образцы были облучены быстрыми ионами $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 167 МэВ в диапазоне флюенсов $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ – $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для модификация поверхностного слоя и синтезированных в нем НЧ цинка. Потери энергии и проекционный пробег ионов $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 167 МэВ в аморфной пленке SiO_2 согласно вычислениям SRIM 2013 [13] составляют:

- потери энергии в электронной системе $dE_{\text{el}}/dx = 14.7 \text{ кэВ/нм}$;
- потери в ядерной системе $dE_{\text{nucl}}/dx = 59.8 \text{ эВ/нм}$;
- проективный пробег $R_p = 18.6 \text{ мкм}$;
- продольный страгглинг $S_{\text{lr}} = 0.576 \text{ мкм}$;
- поперечный страгглинг $S_{\text{lat}} = 0.622 \text{ мкм}$.

Как показано в работе [14] методом малоуглового рассеяния, радиус трека ионов Хе в аморфном SiO_2 является функцией потерь энергии в электронной системе (dE_{el}/dx). В случае ионов Хе с энергией 167 МэВ в матрице SiO_2 потери электронной системы составляют 14.7 кэВ/нм, что соответствует радиусу трека $r \approx 4$ нм. В упомянутой работе была также введена важная величина для оценки влияния ионных треков на облучаемую поверхность, а именно, коэффициент покрытия $CR = \pi r^2 \Phi$, где Φ – флюенс быстрых ионов. Коэффициент покрытия показывает, сколько раз в среднем поверхность пересекается ионными треками. В нашем исследовании в диапазоне флюенсов $\Phi = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ – $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ эта величина со-

ставляет $CR = 0.5$ – 250 . Как уже упоминалось выше, для значительного изменения формы НЧ величины CR должна быть больше 100.

При воздействии БТИ на НЧ цинка важную роль играет максимальный размер НЧ, которые будут плавиться при облучении. В нашем случае при использовании ионов Хе с энергией 167 МэВ максимальный размер НЧ цинка $R_{\text{NP}}^{\text{max}}$ определяется выражением [15]:

$$R_{\text{NP}}^{\text{max}} = \sqrt{\frac{3(dE/dx)_{\text{e,NP}}}{2\pi(H_{\text{NP}}^m \rho_{\text{NP}} + Q)}},$$

где удельные потери энергии иона Хе на электронные возбуждения в цинке составляют $(dE/dx)_{\text{e,NP}} = 29.2 \text{ кэВ} \cdot \text{нм}^{-1}$, удельная теплота плавления цинка $H_{\text{NP}}^m = 7.28 \text{ кДж/моль} = 111.35 \text{ Дж/г}$, плотность цинка $\rho_{\text{Zn}} = 7.133 \text{ г/см}^3$. Здесь Q – теплота, идущая на нагрев НЧ цинка до температуры плавления, определяемая соотношением $Q = \pi_{\text{NP}} c (T_m - T_{\text{irr}})$, где удельная теплоемкость $c = 25.45 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} = \frac{25.45}{65.38} \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{К}} = 0.389 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{К}}$, температура плавления цинка $T_m = 419.6^\circ\text{C}$, а температура образца при облучении $T_{\text{irr}} = 20^\circ\text{C}$. Подставляя в формулу для Q все вышеперечисленные значения, получаем, что $Q = 341 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-3}$, а в итоге максимальный размер плавящихся НЧ цинка составляет $R_{\text{NP}}^{\text{max}} = 44.3 \text{ нм}$.

1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пленки SiO_2 толщиной 170 нм термически выращивали на подложке n -Si (100) в атмосфере сухого кислорода. Затем они были имплантированы ионами $^{64}\text{Zn}^+$ с дозой $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и энергией 50 кэВ при комнатной температуре. Плотность ионного тока была $j \leq 0.5 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$, так что перегрев по сравнению с комнатной температурой не превышал 50°C . Наконец, образцы были облучены ионами $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 167 МэВ в диапазоне флюенсов $1 \cdot 10^{12}$ – $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Топография поверхности образцов была исследована с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) MIRA3 (TESCAN) в режимах вторичной эмиссии (ВЭ) и обратно рассеянных электронов (ОРЭ) в сочетании с энерго-дисперсионной спектроскопией (ЭДС). Визуализация поверхности образцов проводилась также с помощью сканирующего зондового микроскопа MFP-3D (Asylum Research) в полуконтактной моде (AC Air Topography) с применением кантилевера марки HA_NC/Pt (Tipsnano, Россия) жесткостью $3.5 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$ и резонансной частотой свобод-

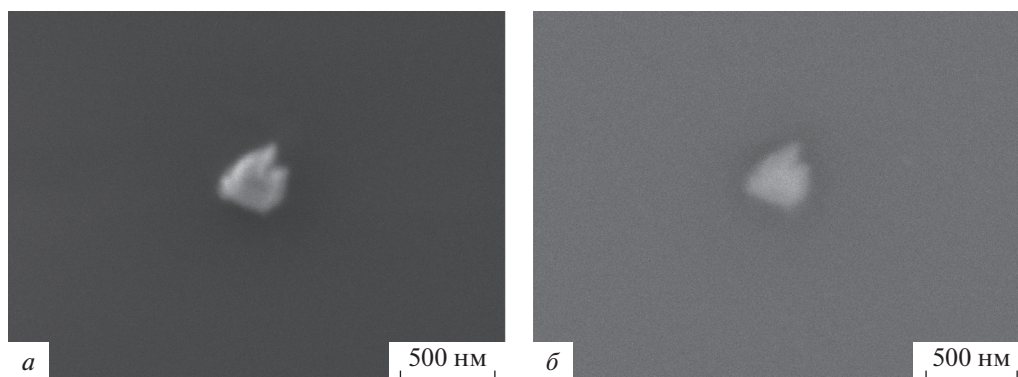


Рис. 1. Изображения пленки SiO_2 после облучения ионами $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 167 МэВ и флюенсом $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ в спектроскопии РЭМ-ВЭ (а) и РЭМ-ООЭ (б).

ных колебаний 140 кГц. Обработка полученных изображений осуществлялась в программе Gwyddion. Структура поперечных сечений имплантированных слоев была исследована с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения (ПЭМ ВР) Tescan G² 20 S-TWIN (FEI) в режиме высокого разрешения (S-TWIN) с ускоряющим напряжением 200 кэВ. Оптические свойства пленок исследовали методами рефлектотрии при комнатной температуре в диапазоне длин волн 400–900 нм. Также регистрировали спектры фотолуминесценции (ФЛ) при 300 и 10 К с использованием обычной техники обработки сигнала. Для ИК-области спектры ФЛ возбуждали фотонами на длине волны $\lambda = 920 \text{ нм}$, которые генерировались GaAs-лазером при мощности $1 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$, а в качестве детектора использовали охлаждаемый Ge-фоторезистор. Для видимого диапазона спектры ФЛ возбуждали HeCd-лазером с длиной волны 325 нм и мощностью $0.5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$. В этом случае спектры ФЛ регистрировали с использованием ФЭУ-79.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Исследования поверхности на растровом электронном микроскопе

На рис. 1 представлены два РЭМ-изображения поверхности пленки SiO_2 после облучения быстрыми ионами Хе с флюенсом $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$: одно (топографическое) в режиме РЭМ-ВЭ (а), а другое (Z-контраст) – в режиме РЭМ-ООЭ (б). На рис. 1а в режиме РЭМ-ВЭ (топологический контраст) видна крупная яркая частица размером менее 500 нм на поверхности пленки SiO_2 . На рис. 1 б та же частица представлена в режиме РЭМ-ООЭ (Z-контраст). В данном режиме изображения она имеет более светлый цвет по сравнению с окружающим фоном. Это свидетельствует о том, что в ее состав входят элементы тяжелее, чем Si и O. На рис. 2

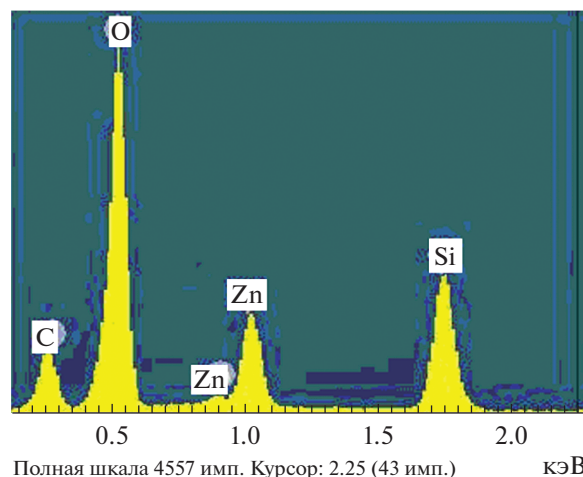


Рис. 2. ЭДС-спектр по кадру после облучения Хе.

представлен ЭДС-спектр этой частицы, из которого следует, что она состоит из нескольких элементов, а именно, элементов матрицы Si и O, имплантированного Zn и C. Их численные значения приведены в табл. 1, из которой следует, что кроме элементов оксидной пленки SiO и имплантированного Zn также зафиксировано загрязнение углеводородами. Это связано с недостаточной очисткой атмосферы вакуумной камеры от паров масла, т.к. мы используем масляную откачку рабочей камеры имплантера. После всего изложен-

Таблица 1

Элемент	Весовые %	Атомные %
O-K	18.56	21.53
Si-K	53.32	35.25
Zn-K	0.19	0.05
C-K	27.93	43.17
Итого	100.00	100

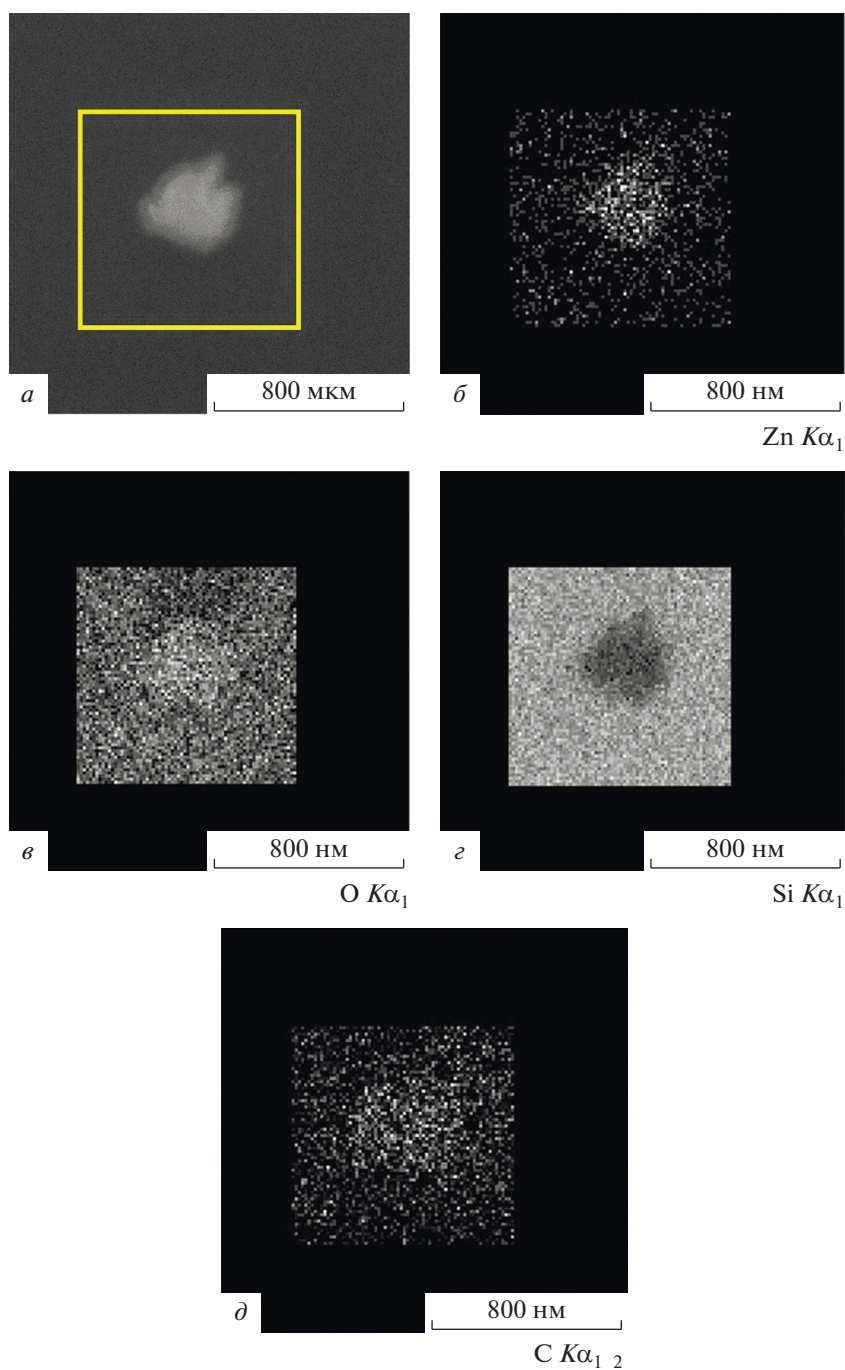


Рис. 3. ЭДС-спектр пленки SiO_2 после облучения Хе по квадрату: *a* – РЭМ-ВЭ-изображение; карты для элементов по линиям спектра $\text{Zn } K\alpha_1$ (*б*); $\text{O } K\alpha_1$ (*в*); $\text{Si } K\alpha_1$ (*г*) и $\text{C } K\alpha_{1_2}$ (*д*).

ного стало очевидно, что яркая частица на рис. 1 содержит Zn. Это могут быть как частицы самого цинка, так и его оксидных соединений типа ZnO или, что менее вероятно при такой низкой температуре имплантации, Zn_2SiO_4 . Возможно также, что частица представляет собой их смесь.

Дополнительным подтверждением к вышеизложенным соображениям являются ЭДС-карты

элементов, представленные на рис. 3. Светлое пятно на карте для линии спектра $\text{Zn } K\alpha_1$ показывает наличие этого элемента в рассматриваемой частице. При этом темные пятна на картах для линии спектра $\text{Si } K\alpha_1$ показывают отсутствие этого элемента в рассматриваемой частице. Светлое пятно на рис. 3в на ЭДС карте $\text{O } K\alpha_1$ может свидетельствовать о том, что рассматриваемая частица

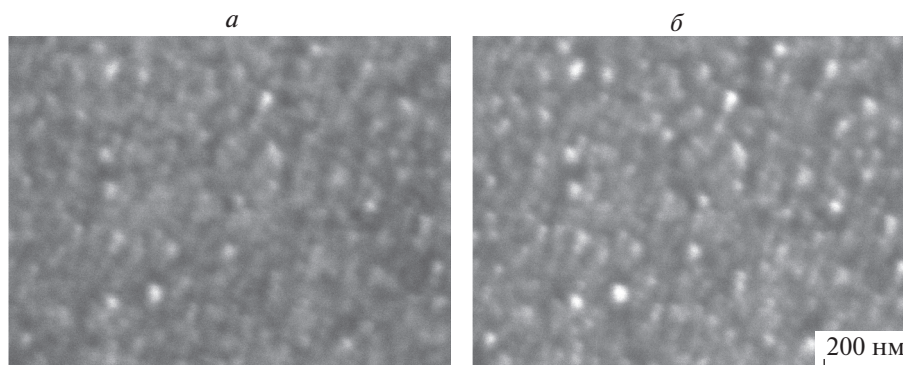


Рис. 4. Изображения поверхности образца Si, имплантированного Zn, после облучения ионами Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, в микроскопии РЭМ-ВЭ (а) и РЭМ-ОРЭ (б).

содержит кислород, т.е. принадлежит фазе ZnO или смеси $\text{Zn} \cdot \text{ZnO}$.

На рис. 4 приведены РЭМ-ВЭ- и РЭМ-ОРЭ-изображения поверхности Si-подложки, имплантированной Zn, после облучения ионами Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. На рис. 4а видно, что в режиме топологического контраста на изображении наблюдаются как яркие пятна-бугорки, так и темные пятна — кратеры. На рис. 4б представлено изображение той же площади, но уже в режиме Z-контраста. Из этого рисунка следует, что многие яркие пятна на рис. 4а сохранили свою яркость и на рис. 4б. Иначе говоря, они состоят из элементов тяжелее, чем элементы матрицы Si и O. По всей видимости, эти бугорки являются Zn-содержащими НЧ, размеры которых менее 100 нм, как следует из изображений на рис. 4. На рис. 4б темные пятна (впадины — кратеры) в большинстве своем сохранили темный фон как на рис. 4а. Иначе говоря, они состоят из элементов, которые легче элементов матрицы, т.е. кремния и кислорода. По всей видимости, эти кратеры заполнены углеводородными загрязнениями.

На рис. 5 представлен ЭДС-спектр, снятый по кадру РЭМ (рис. 4). Из рис. 5 следует, что ЭДС-спектр ожидаемо состоит из нескольких элементов, а именно, элементов матрицы Si и O, имплантированного Zn и загрязнения углеводородами C. Численные значения этих элементов приведены в табл. 2. Из анализа данных становится ясно, что визуализированные яркие НЧ на поверхности пленки оксида кремния содержат Zn. Это могут быть как частицы самого металлического Zn, так и его оксидных соединений типа ZnO или, что возможно при высоком флюенсе Хе, Zn_2SiO_4 . Возможно также, что яркая НЧ представляет по составу их смесь.

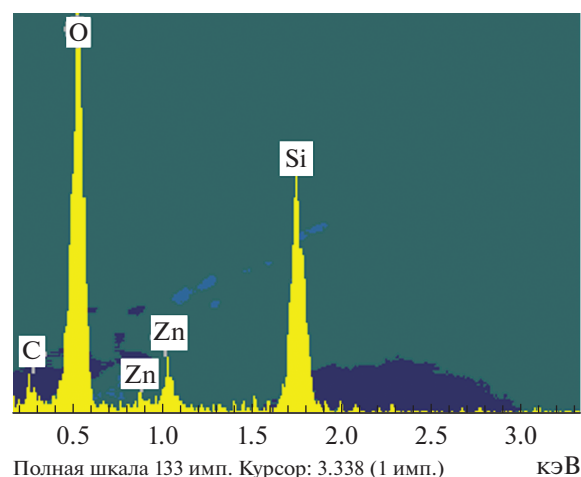


Рис. 5. ЭДС-спектр по кадру рис. 4 после флюенса Хе $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

2.2. Анализ топологии поверхности на атомно-силовом микроскопе

На рис. 6 представлены 2D-изображения поверхности оксида кремния после имплантации цинка (а) и после облучения быстрыми ионами Хе (б). После имплантации цинка поверхность характеризуется следующими параметрами: $R_a = 0.141 \text{ нм}$, а $R_{ms} = 0.189 \text{ нм}$. На рис. 7 представлены 2D-изображения поверхности образца после

Таблица 2

Элемент	Весовые %	Атомные %
O-K	21.72	26.77
Si-K	58.93	42.30
Zn-K	1.08	0.30
C-K	18.26	30.64
Итого	100.00	100

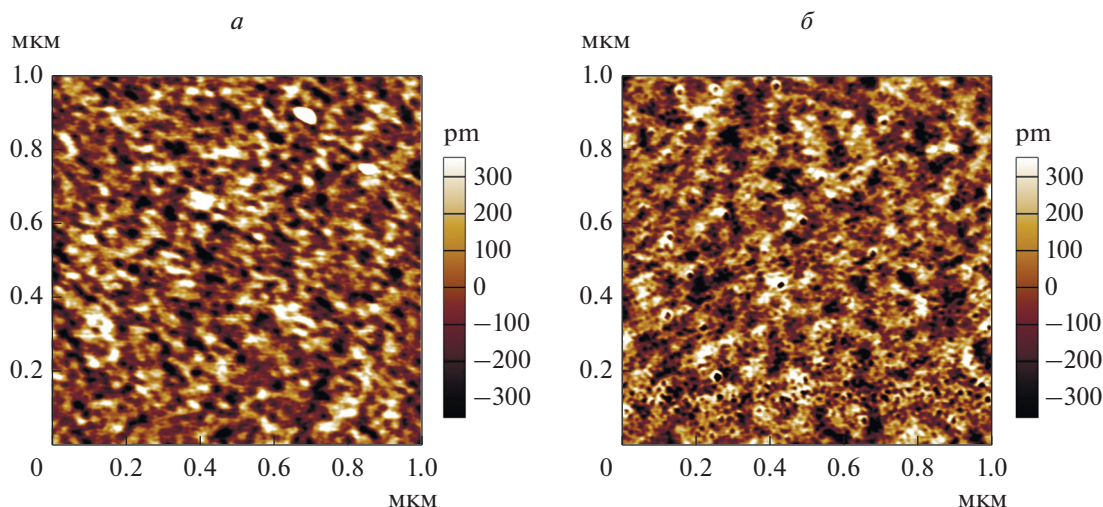


Рис. 6. 2D АСМ-изображение поверхности SiO_2 после имплантации Zn и имплантированного образца после облучения быстрыми ионами Хе с флюенсом 10^{14} см^{-2} .

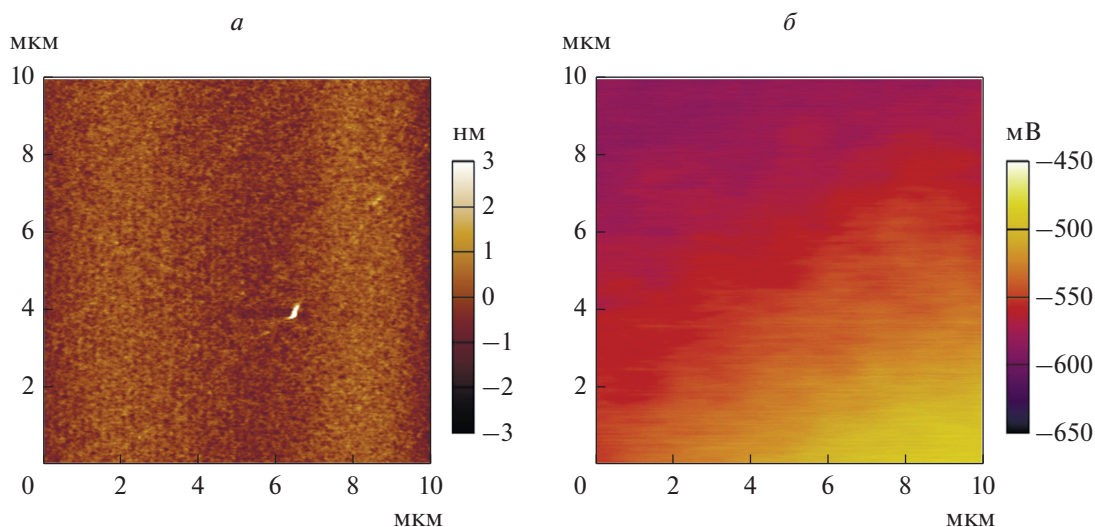


Рис. 7. АСМ топографическое изображение (а) и потенциал поверхности (б) в кельвин-море для поверхности SiO_2 после имплантации Zn.

имплантации Zn в кельвин-море: топографическое изображение (а) и поверхностный потенциал (б). Как видно из этих изображений, поверхность после имплантации достаточно однородна по шероховатости. На рис. 6а видна только одна частица на поверхности пленки SiO_2 . Поскольку она наблюдается на достаточно большой площади $10 \times 10 \text{ мкм}$, то ее можно считать неким артефактом технологии ионного внедрения. Тем более что на изображении поверхностного потенциала (рис. 6б) она не зафиксирована.

На рис. 6б представлено 2D-изображение поверхности имплантированного образца после облучения быстрыми ионами Хе с флюенсом 10^{14} см^{-2} . Поверхность характеризуется следующими параметрами: среднее значение неоднородности по-

верхности составляет $R_a = 0.148 \text{ нм}$, а $R_{ms} = 0.190 \text{ нм}$. Из этого следует, что шероховатость поверхности несколько увеличилась после облучения Хе по сравнению с ее состоянием после имплантации Zn. Относительно размеров неоднородностей поверхности в плоскости можно отметить, что они увеличились, т.е. поверхность структурируется. Такое структурирование поверхности в плане мы связываем с образованием латентных областей внутри матрицы пленки SiO_2 при пролете быстрых ионов Хе, который сопровождается локальным разогревом, а также расплавлением небольших (до 40 нм, см. расчет выше) НЧ цинка. При этом возможна диффузия Zn к поверхности образца, образованием его скоплений вблизи поверхности, создающих неровности на самой поверхности. Также

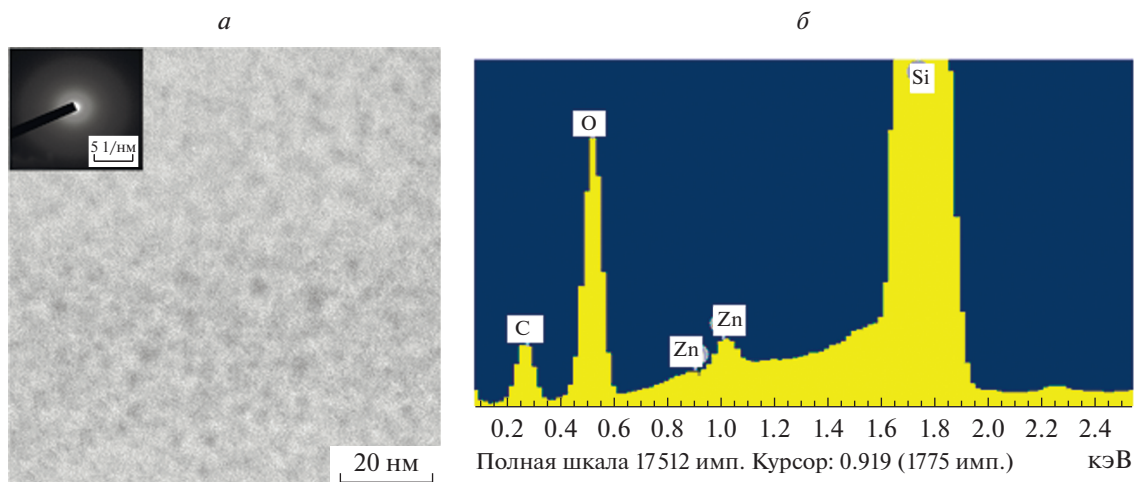


Рис. 8. ПЭМ-изображения поперечного сечения приповерхностного слоя пленки SiO_2 после имплантации Zn (а) и ЭДС-спектр в центре имплантированного цинка на глубине 40 нм (б).

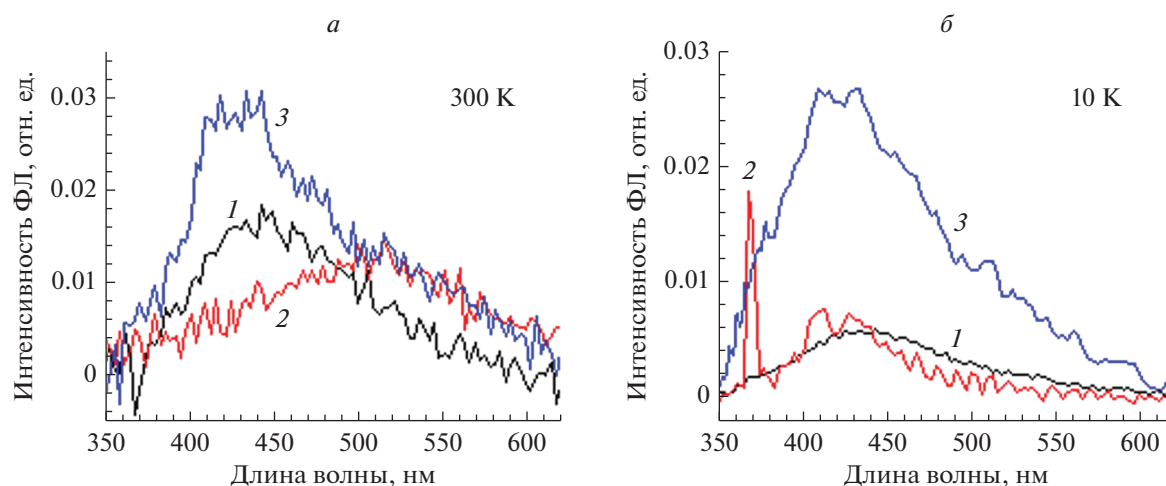


Рис. 9. Спектры ФЛ пленки SiO_2 , исходной (1), имплантированной Zn (2) и облученной быстрыми ионами Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (3): 300 К (а) и 10 К (б). Кривая 2 на рис. (б) сдвинута вверх на 0.01 отн. ед. для наглядности.

возможен вылет цинка в окружающую атмосферу с образованием поверхностных пор небольших размеров (около 10 нм).

2.3. Анализ поперечных сечений на просвечивающем электронном микроскопе

На рис. 8 представлены ПЭМ-изображения поперечного сечения приповерхностного слоя пленки SiO_2 после имплантации ионами Zn. Из анализа ПЭМ-изображений на рис. 8а следует, что после имплантации Zn на глубине около его проекционного пробега в SiO_2 , который, согласно программе SRIM, составляет 38.4 нм, а продольный страглинг равен 11.2 нм, располагаются НЧ цинка со средним размером около 10 нм. Эти НЧ являются аморфными, т.к. атомные плоскости цинка не выявляются (рис. 8а) и электроно-

грамма (вставка на рис. 8а) представляет из себя гало. Образование мелких НЧ в пленке SiO_2 непосредственно вблизи поверхности обусловлено методикой приготовления опытных образцов и не связано с цинком. На рис. 8б представлен ЭДС-спектр на глубине примерно 40 нм, из которого видно, что кроме элементов матрицы пленки (кремния и кислорода) присутствует имплантированный цинк и загрязнения углеводородами.

2.4. Исследование спектров фотолюминесценции (ФЛ)

На рис. 8 представлены спектры ФЛ образцов, снятые при температурах 300 (а) и 10 К (б). Спектры исследованы для образцов исходного, после имплантации Zn, и полученного путем облучения быстрыми ионами Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Из

кривой на рис. 8а видно, что для исходной пленки SiO_2 наблюдается уширенный пик ФЛ с центром около 440 нм, обусловленный нестехиометрическими структурными точечными дефектами и их кластерами, возникшими при термическом росте оксидной пленки. После имплантации Zn, как это следует из кривой 2 на этом рисунке, происходит уменьшение интенсивности ФЛ, которое сопровождается сдвигом пика ФЛ в длинноволновую область до значения примерно 520 нм. После облучения образца быстрыми ионами Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ пик ФЛ имеет максимум вновь при 440 нм. На рис. 8б представлены спектры, снятые при 10 К. Как видно из всех трех спектров, максимум интенсивности ФЛ находится примерно на длине волны 440 нм. Однако для образца после имплантации цинка на фоне уширенного пика с центром около 430 нм, наблюдается узкий пик ФЛ на длине волны 370 нм, связанный с образованием фазы ZnO и обусловленный экситонной рекомбинацией в этом материале. Это стало возможным, поскольку в матрице оксида кремния, очевидно, имеется достаточное количество атомов кислорода, а при имплантации Zn происходит локальный нагрев, при котором атомы кислорода становятся свободными и могут частично окислить имплантированный цинк. После облучения образца быстрыми ионами Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ пик ФЛ при 370 нм практически исчезает, что может указывать на уменьшение содержания фазы ZnO за счет ее распада в исследуемой пленке. В то же время уширенный пик ФЛ с центром при 420 нм, обусловленный радиационными структурными дефектами, при этом значительно увеличивается.

ВЫВОДЫ

1. После облучения ионами Хе с флюенсом $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ на поверхности пленки SiO_2 зафиксированы отдельные Zn-содержащие частицы с размерами порядка 100 нм.
2. После облучения ионами Хе с флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ на поверхности пленки SiO_2 зафиксированы Zn-содержащие частицы с размерами порядка менее 100 нм и кратеры тоже размера.
3. После имплантации цинка, согласно данным АСМ, параметры шероховатости составляют: $R_a = 0.141 \text{ нм}$, а $R_{ms} = 0.189 \text{ нм}$. После облучения имплантированного образца Хе с флюенсом $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, шероховатость поверхности несколько увеличивается и она характеризуется следующими параметрами: среднее значение шероховатости составляет $R_a = 0.148 \text{ нм}$, а $R_{ms} = 0.190 \text{ нм}$.
4. После имплантации Zn в пленку оксида кремния обнаружена фаза ZnO с характерным пиком ФЛ на длине волны 370 нм.
5. Облучение быстрыми ионами Хе приводит к разрушению фазы ZnO, что подтверждается ис-

чезновением экситонного пика ФЛ на длине волны 370 нм.

6. Облучение быстрыми ионами Хе приводит к формированию большого количества радиационных дефектов с характерной ФЛ-пиком на длине волны 430 нм.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ФАНО России (Гос. проект 14, тема 40.3, раздел № 00662014-0025 и тема 40.2, раздел № 0066-2014-0024) и ИФТТ РАН. Исследования методами сканирующей зондовой микроскопии выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ на оборудовании ЦКП “Материаловедение и металлургия” НИТУ “МИСиС” (госзадание № 11.9706.2017/7.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Litton C.W., Collins T.C., Reynolds D.S. Zinc oxide material for electronic and optoelectronic device application. Chichester: Wiley, 2011.
2. Umeda N., Amekura H., Kishimoto N. // Vacuum. 2009. V. 83. P. 645.
3. Jiang C.Y., Sun X.W., Lo G.Q. et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. Art. № 263501.
4. Li C., Yang Y., Sun X.W. et al. // Nanotechnology. 2007. V. 18. Art. № 135604.
5. Chu S., Olmedo M., Yang Zh. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. Art. № 181106.
6. Smestad G.P., Gratzel M. // J. Chem. Educ. 1998. V. 75. P. 752.
7. Dodds J.S., Meyers F.N., Loh K.J. // Smart Struct. Systems. 2013. V. 12. Art. № 055.
8. Bagnall D.M., Chen Y.F., Shen M.Y. et al. // J. Cryst. Growth. 1998. V. 184/185. P. 605.
9. Chang H., Park H.D., Sohn K.S., Lee J.D. // J. Korean Phys. Soc. 1999. V. 34. P. 545.
10. Straumal B.B., Mazilkin A.A., Protasova S.G. и др. // Phys. Rev. B. 2009. V. 79. Art. № 205206.
11. Son D.I., Park D.H., Choi W.K. et al. // Nanotechnology. 2009. V. 20. Art. № 195203.
12. Privezentsev V., Kulikauskas V., Steinman E., Bazhenov A. // Phys. Stat. Sol. C. 2013. V. 10. P. 48.
13. Amekura H., Takeda Y., Kishimoto N. // Mater. Lett. 2011. V. 222. P. 96.
14. Shen Y.Y., Zhang X.D., Zhang D.C. et al. // Mater. Lett. 2011. V. 65. P. 2966.
15. Privezentsev V.V., Makunin A.V., Batrakov A.A. et al. // Semiconductors. 2018. V. 52. P. 645.
16. D'Orleans C., Stoquert J., Estourne's C. et al. // Phys. Rev. B. 2003. V. 67. Art. № 220101R.
17. Комаров Ф.Ф., Мильчанин О.А., Скуратов В.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 2. С. 160; Komarov F.F., Milchanin O.A., Skuratov V.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. P. 141.
18. <http://www.srim.org>
19. Kluth P., Schnohr C.S., Pakarinen O.H. et al. // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101. Art. № 175503.
20. Amekura H., Ishikawa N., Okubo N. et al. // Phys. Rev. B. 2011. V. 83. Art. № 205401.