

УДК 548.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНКИ НИТРИДА КРЕМНИЯ, В КОТОРУЮ ИМПЛАНТИРОВАНЫ ИОНЫ ЦИНКА

© 2024 г. В. В. Привезенцев^{а,*}, А. А. Фирсов^а, В. С. Куликаускас^б, Д. А. Киселев^с,
Б. Р. Сенатулин^с

^а Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук,
Москва, 117218 Россия

^б Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^с Национальный исследовательский технологический университет “МИСИС”, Москва, 119049 Россия

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

Поступила в редакцию 29.03.2024 г.

После доработки 20.05.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

Приведены результаты исследования нанокластеров в пленке Si_3N_4 на подложке из Si, в которую имплантированы ионы $^{64}\text{Zn}^+$ с энергией 40 кэВ при дозе $5 \times 10^{16}/\text{см}^2$. Пленку Si_3N_4 наносили на кремниевую подложку газофазным методом. Затем образцы после имплантации отжигали на воздухе в диапазоне температур 400–700°C с шагом 100°C в течение 1ч на каждом шаге. Морфология поверхности образцов была исследована с помощью сканирующей зондовой микроскопии. Профили имплантированной примеси и элементов пленки, а также химическое состояние иона Zn исследовали с помощью рентгеновской фотоэлектронной и оже-электронной спектроскопии. Методом сканирующей зондовой микроскопии обнаружено, что после имплантации вблизи поверхности пленки Si_3N_4 зафиксированы отдельные кластеры металлического цинка размером порядка 100 нм и менее. В процессе отжига происходит их рост с одновременным превращением в фазу ZnSiN_2 и, возможно, в фазы оксида и силицида цинка вблизи поверхности. После отжига при температуре 700°C в пленке Si_3N_4 образуются Zn-содержащие кластеры размером около 100 нм.

Ключевые слова: кремниевая подложка, пленка Si_3N_4 , имплантация цинка, нанокластеры, отжиг в окислительной среде, оксид цинка.

DOI: 10.31857/S1028096024120049, EDN: QXGGUU

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время нанокластеры оксида цинка привлекают большое внимание из-за их возможного применения в устройствах микроэлектроники [1]. ZnO является прямозонным полупроводниковым материалом с шириной запрещенной зоны 3.37 эВ и имеет большую энергию связи между электроном и дыркой в экситоне (60 мэВ). Поэтому такой материал перспективен в оптоэлектронных устройствах. Он также обладает сорбционным эффектом [2] и в форме наночастиц (НЧ) является ферромагнетиком уже при комнатной температуре [3]. Поэтому нанокластеры ZnO

перспективны для создания газовых и химических датчиков для биологии и медицины [4–6] и устройств спинтроники [7]. В настоящее время известно также применение нанокластеров ZnO в солнечных элементах нового поколения — ячейках Гретцеля (Gratzel M.) [8]. Обычно нанокластеры оксида цинка создают, например, в кварце методом ионной имплантации с последующим термическим окислением [9–12].

В настоящей работе приведены результаты исследования нанокластеров в пленке $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$, в которую имплантированы ионы $^{64}\text{Zn}^+$ с энергией 40 кэВ при дозе $5 \times 10^{16}/\text{см}^2$. Пленку Si_3N_4 пред-

варительно наносили на кремниевую подложку газофазным методом. Затем образцы после имплантации отжигали на воздухе в диапазоне температур 400–700°C с шагом 100°C в течение 1 ч на каждом шаге. Настоящая работа является фактическим продолжением ранее осуществленной работы [13].

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Технология подготовки образцов описана в работе [13].

Морфология поверхности образцов была исследована с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) Ntegra Prima (НТ-МДТ Спектрум Инструмент, Россия) в полуконтактном режиме, сигнал поверхностного потенциала регистрировали на втором проходе с применением зонда Кельвина на высоте 50 нм от поверхности пленок. При измерениях использовали кантилевер марки NSG10/Pt (НТ-МДТ СИ) с жесткостью 8 Н/м и резонансной частотой свободных колебаний 210 кГц. Обработка полученных изображений осуществлена в программе Gwyddion (версия 2.60) [14].

Состояние Zn в пленках определяли с помощью рентгеновского фотоэлектронного спектрометра (РФЭС) PHI5500 VersaProbe II. Калибровка шкалы энергии связи $E_{\text{св}}$ была проведена по энергиям линий Au4f (84.0 эВ) и Cu2p³ (932.6 эВ). Погрешность определения энергий связи составила 0.2 эВ. Источником возбуждения служило монохроматизированное AlK_α-излучение ($h\nu = 1486.6$ эВ) с мощностью источника 25 Вт, диаметр пучка составлял 100 мкм. При исследовании использовали нейтрализатор. При учете эффекта компенсации в каждом отдельном измерении оже-спектры были сдвинуты в сторону меньших значений энергии связи на величину около 1–2 эВ, перекомпенсация была разная у разных образцов, а также она иногда изменялась в процессе травления при профильном анализе. Для коррекции на исходной поверхности образцов (до имплантации ионов цинка и отжига) использовали линию C1s (285 эВ). На большой глубине, где мало или совсем нет Zn, для этих целей использовали одновременно линии N1s и Si2p. Сдвиг по энергии подбирали так, чтобы обе эти линии были максимально близки к справочным значениям [15, 16] для Si₃N₄ $E_{\text{св}}(\text{N1s}) = 397.4$ эВ, $E_{\text{св}}(\text{Si2p}) = 101.8$ эВ.

Обзорные спектры были сняты в диапазоне 0–1100 эВ при энергии пропускания анализатора $E_{\text{pass}} = 117.4$ эВ с шагом 1 эВ. Спектры высокого

разрешения методами РФЭС состояния Zn2p³ и ОЭС перехода Zn LMM (Zn L₃M₄₅M₄₅) сняты при $E_{\text{pass}} = 23.5$ эВ и с шагом 0.2 эВ или при $E_{\text{pass}} = 29.35$ эВ и с шагом 0.25 эВ. Корректировку шкалы энергии связи ($E_{\text{св}}$) не проводили. Химическое состояние цинка определяли с помощью оже-параметра $\alpha' = E_{\text{кин}}(\text{Zn L}_3\text{M}_{45}\text{M}_{45}) + E_{\text{св}}(\text{Zn2p}^3)$, где $E_{\text{кин}}(\text{Zn L}_3\text{M}_{45}\text{M}_{45}) = 1486.6 - E_{\text{св}}(\text{Zn L}_3\text{M}_{45}\text{M}_{45})$ в эВ.

При элементном анализе атомные концентрации определяли методом факторов относительной элементной чувствительности [17] по обзорным спектрам и профилям травления. Концентрации определяли по измеренным интегральным интенсивностям следующих линий: C1s, O1s, Si2s, N1s, Zn2p³. Для послойного анализа использовали травление ионами Ar⁺ с энергией 1 кэВ с пучком размером 1×1 мм. При травлении использовали нейтрализацию. Травление проводили в альтернативном режиме (чередование этапов съемки и травления). Скорость травления, определенная на термическом оксиде кремния, в данном режиме составляет примерно 5.3 нм/мин. Снятие профилей травления проводили с остановками для снятия спектров высокого разрешения, а затем полученные концентрационные профили объединяли.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования с помощью атомно-силовой микроскопии

По данным сканирующей зондовой микроскопии обнаружено, что после имплантации вблизи поверхности пленки Si₃N₄ зафиксированы отдельные нанокластеры металлического цинка (рис. 1а), которые проявляются на изображении поверхностного потенциала в виде темных областей диаметром менее 1 мкм с меньшим значением потенциала по сравнению с пленкой Si₃N₄/Si (рис. 1б). Установлено также, что среднеквадратичная шероховатость поверхности образца после имплантации составляет $R_{\text{ms}} = 0.7$ нм. После отжига пленки при 700°C наблюдали увеличение значения среднеквадратичной шероховатости поверхности до $R_{\text{ms}} = 1$ нм (рис. 2а).

Гистограммы распределения радиуса частиц в исследуемых образцах представлены на рис. 3. Полученные зависимости хорошо описываются гауссовским распределением, согласно которому для образца после имплантации средний размер частиц составил $D_1 = 105 \pm 3$ нм (рис. 3а), а для отожженного образца — $D_2 = 83 \pm 3$ нм (рис. 3б).

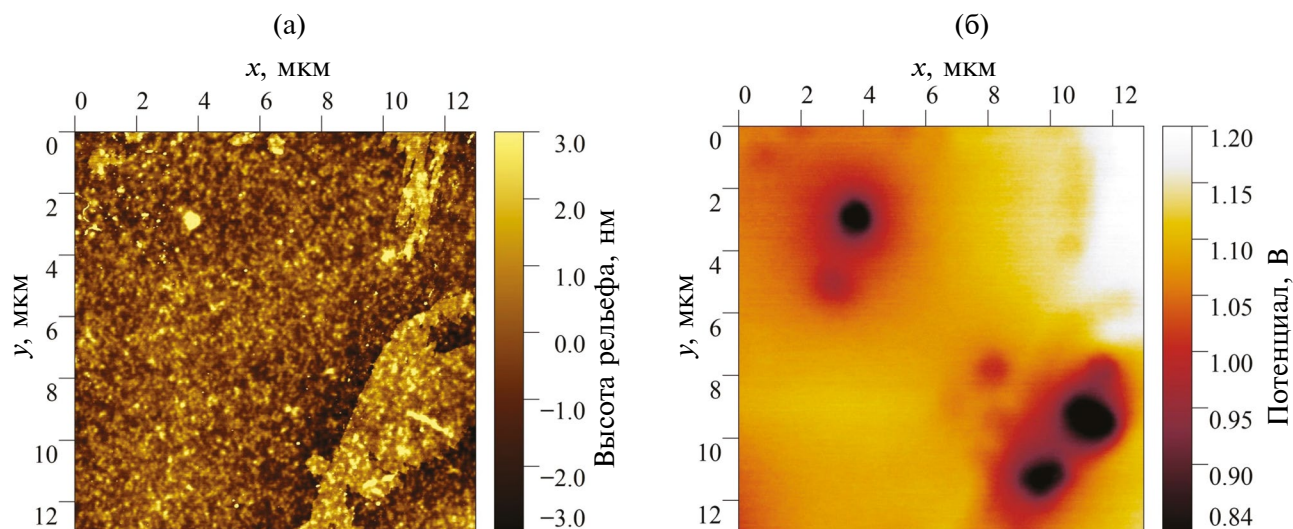


Рис. 1. Изображения пленки $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ после имплантации: а — топография; б — сигнал поверхностного потенциала.

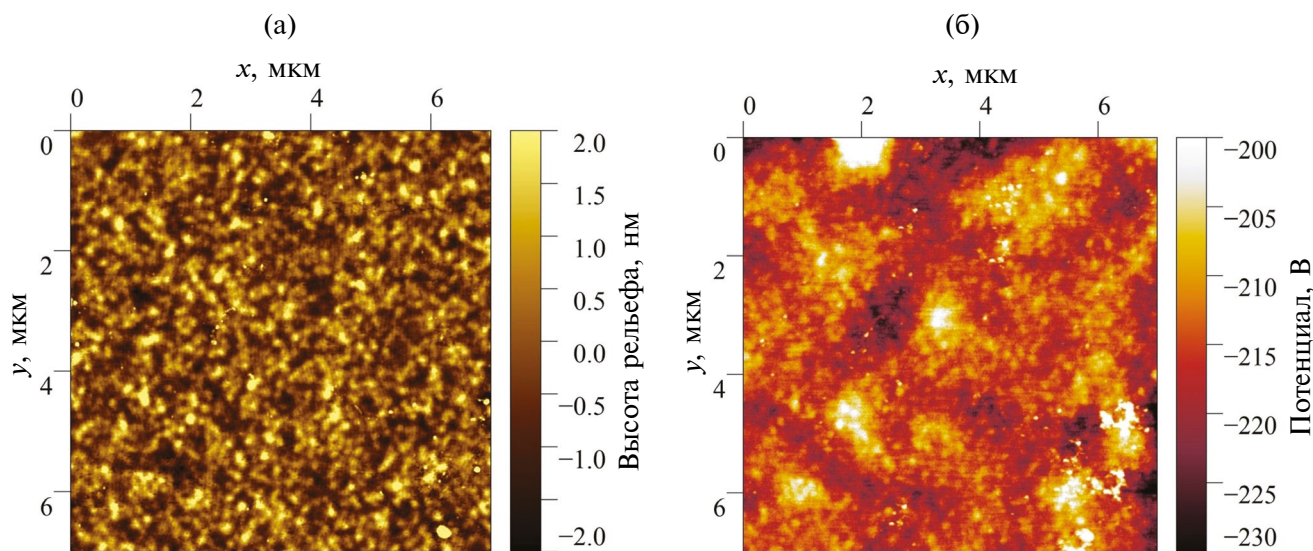


Рис. 2. Изображения пленки $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ после отжига при 700°C : а — топография; б — сигнал поверхностного потенциала.

Также следует отметить изменения в значениях и смене знаке сигнала поверхностного потенциала — с положительного для имплантированной пленки (рис. 4, кривая 1) на отрицательный для отожжённой при 700°C (рис. 4, кривая 2).

Из этого следует, что нанокластеры в отожженном образце уже не состоят из проводящего материала (Zn), а скорее всего, состоят из диэлектрического материала, наиболее вероятно из оксида цинка ZnO.

Исследования методами рентгеновской фотоэлектронной и оже-электронной спектроскопии

На рис. 5 и 6 представлены профили элементов в образце после имплантации в него ионов цинка

и после отжига при 700°C . Максимум имплантированного цинка несколько уширен и располагается на глубине около 27 нм. Из профилей на рис. 5 видно, что в образце после имплантации атомы кислорода находятся на поверхности пленки нитрида кремния в слое толщиной до 5 нм. В саму пленку Si_3N_4 после имплантации цинка кислород почти не проникает. На поверхности возможно образование тонкого слоя состава $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$, толщину которого использованными средствами определить практически невозможно.

На рис. 6 видно, что после отжига при 700°C на поверхности образца присутствует увеличившийся слой, содержащий адсорбированный кислород, толщиной 6–8 нм. Этот слой, предположительно, может состоять из оксинитрида кремния

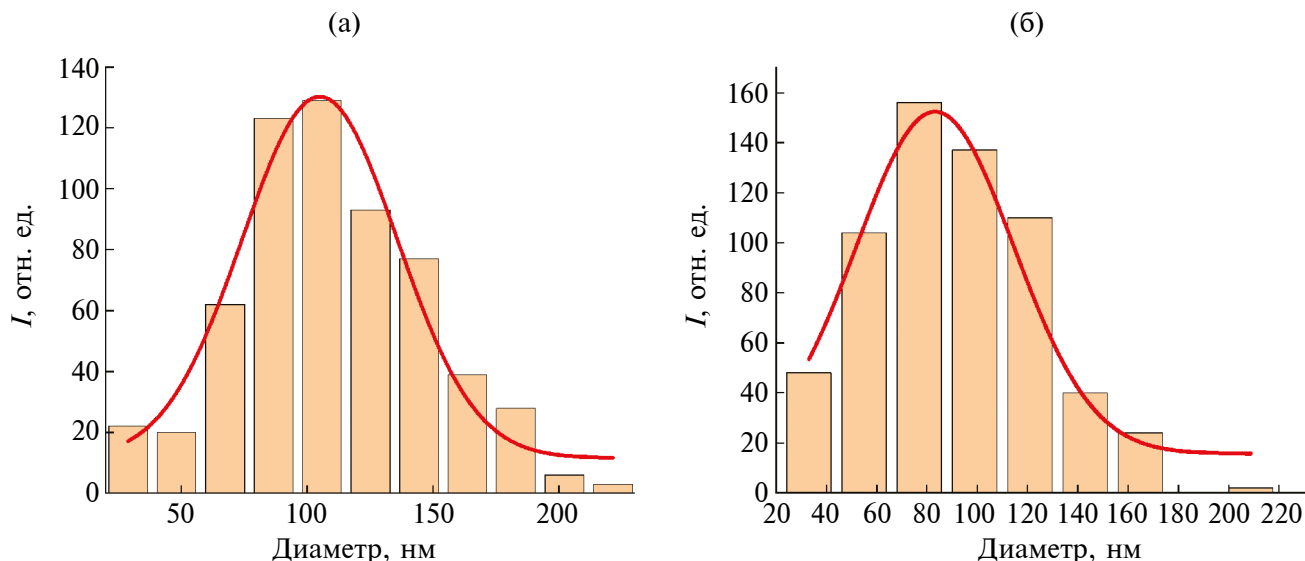


Рис. 3. Гистограммы распределения частиц в плоскости по размеру: а — после имплантации; б — после отжига при 700°C.

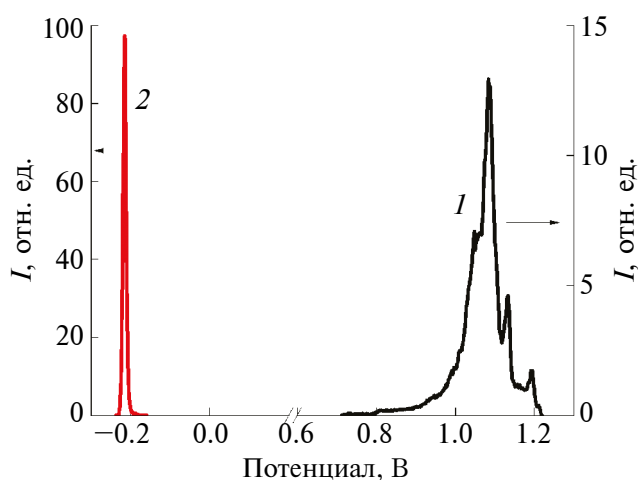


Рис. 4. Гистограммы распределения поверхностного потенциала: 1 — после имплантации; 2 — после отжига при 700°C.

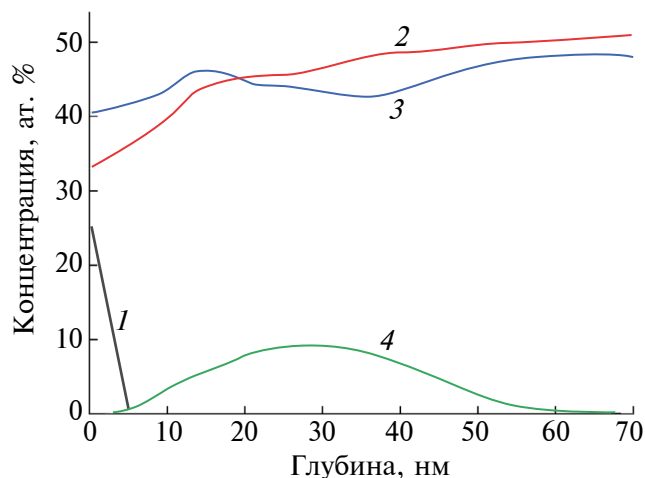


Рис. 5. Профили концентрации элементов после имплантации: 1 — O; 2 — N; 3 — Si; 4 — Zn.

(SiO_xN_y). Профиль имплантированного цинка несколько изменил свою форму: кроме главного максимума, который несколько сдвинулся к поверхности и находится теперь на глубине примерно 23 нм, на поверхности появился дополнительный максимум. Такое поведение концентрационного профиля имплантированной примеси достаточно очевидно, поскольку хорошо известно [18], что при длительном отжиге (как и в нашем случае) профиль имплантированной примеси имеет тенденцию сдвигаться к поверхности, которая является для нее неограниченным стоком дефектов.

В табл. 1 и 2 приведены оже-параметры (AP) на разной глубине в образце в точках определе-

ния концентрационных профилей. Соответствующие РФЭС- и оже-спектры цинка приведены на рис. 7 и 8.

В базе NIST [15] приведены значения оже-параметров состояния $2p^{3/2}$ и перехода $L_3M_{45}M_{45}$ для Zn^0 , равные 2013.4–2014.4 эВ, а для цинка в ZnO 2009.5–2011.0 эВ. Оже-параметр для цинка в Zn_3N_2 равен 2012.3 эВ, а $E_{\text{св}}(\text{Zn}2p^3) = 1022.0$ эВ, $E_{\text{кин}} = 990.0$ –990.3 эВ [19]. Низкое значение оже-параметра цинка в исследованных образцах свидетельствует о том, что после имплантации в пленку нитрида кремния цинк находится в состоянии с положительным зарядом от 1+ до 2+. Так как кислорода в этой области образца нет, то за ионное состояние цинка ответственны связи

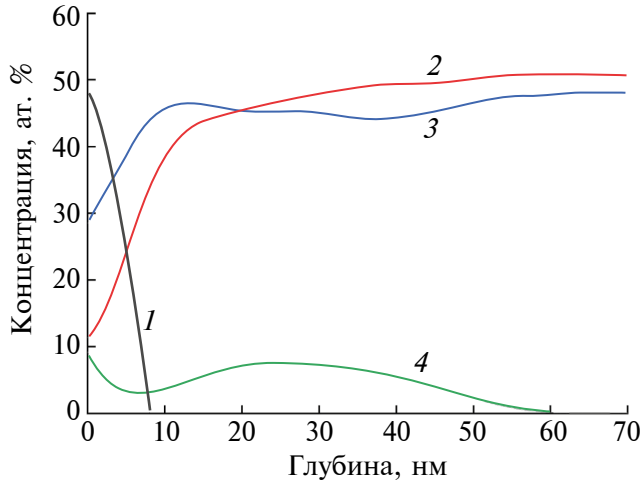


Рис. 6. Профили концентрации элементов после отжига при 700°C: 1 — O; 2 — N; 3 — Si; 4 — Zn.

Таблица 1. Оже-параметр AP для состояния $2p^{3/2}$ и перехода $L_3M_{45}M_{45}$ для цинка в образце после имплантации на различной глубине. Погрешность определения AP составляет 0.5 эВ

Глубина, нм	AP , эВ
0	2010.8
5.3	2011.6
23.9	2011.4
45.1	2011.2
55.7	2010.9

Таблица 2. Оже-параметр AP для состояния $Zn2p^{3/2}$ и перехода $L_3M_{45}M_{45}$ для цинка в образце после отжига при 700°C на различной глубине. Погрешность определения AP составляет 0.5 эВ

Глубина, нм	AP , эВ
0	2009.3
2.7	2010.3
13.3	2011.4
29.2	2011.2
50.4	2011.1

с азотом. В системе Zn–Si–N возможно образование тройного полупроводникового соединения $ZnSiN_2$ [20]. Не исключено также и образование нитрида Zn_3N_2 или азиды цинка $\alpha\text{-Zn}(\text{N}_3)_2$. В настоящей работе в адсорбированном слое кислорода после имплантации сформировались Zn-содержа-

щие дефекты в виде наночастиц металлического цинка и после отжига — оксида цинка. В пленке нитрида кремния после имплантации в нее ионов цинка образовались наночастицы металлического цинка, а после отжига — предположительно его соединения с азотом согласно работе [20].

Для послойного анализа использовали травление ионами Ag^+ . Следует отметить, что кислород при травлении уходит заметно медленнее и не сразу, причем здесь нужно считать, речь идет здесь о взаимодействии распыляющих ионов Ag^+ с распыляемым веществом, а эффект вбивания при травлении и атомное перемешивание [21], являются факторами, ограничивающими разрешение по глубине. В нашем случае есть также систематическая ошибка, вызванная использованием усредненных факторов элементной чувствительности в программе Multipak [22], которая она может достигать значительной величины (до 30 ат. %).

На рис. 7 представлены РФЭС- (рис. 7а) и оже-спектры (рис. 7б) от образцов после имплантации. На рис. 7а видно, что с изменением глубины исследования максимум РФЭС-спектров цинка практически не изменяется и составляет 1022.3 эВ. Это соответствует оксиду цинка, согласно [23], (РФЭС-максимум при 1022.0 эВ) и положительному заряду цинка. Из анализа рис. 7б следует, что при изменении глубины в образце максимум оже-спектров не изменяется и составляет 989.0 эВ, что соответствует положительному заряду цинка в пределах от 1 до 2, т.к. для оксида цинка ZnO положение максимума оже-пика соответствует значению 989.0 эВ, а для металлического цинка — 992.0 эВ [23]. Низкое значение AP цинка свидетельствует о том, что к оксиду цинка ZnO может подмешиваться нестехиометрическая фаза Zn_2O или даже фаза металлического цинка, что менее вероятно. Все это относится к тонкому слою, в котором есть кислород.

Спектры цинка в точках измерения профилей образца после отжига при 700°C. Образец после отжига при 700°C травился 0.5 мин на глубину 2.5 нм. На рис. 8 представлены результаты РФЭС и оже-спектры образцов после имплантации. На рис. 8а видно, что с изменением глубины исследования максимум РФЭС-спектров цинка немного изменяется от 1022.7 до 1022.2 эВ. Положение самого максимума сигнала РФЭС практически не изменилось от случая после имплантации. Однако уменьшение значения энергии связи, соответствующей максимуму РФЭС-спектра может быть обусловлено погрешностью измерений. Из рис. 8б следует, что при изменении глубины максимум оже-спектров

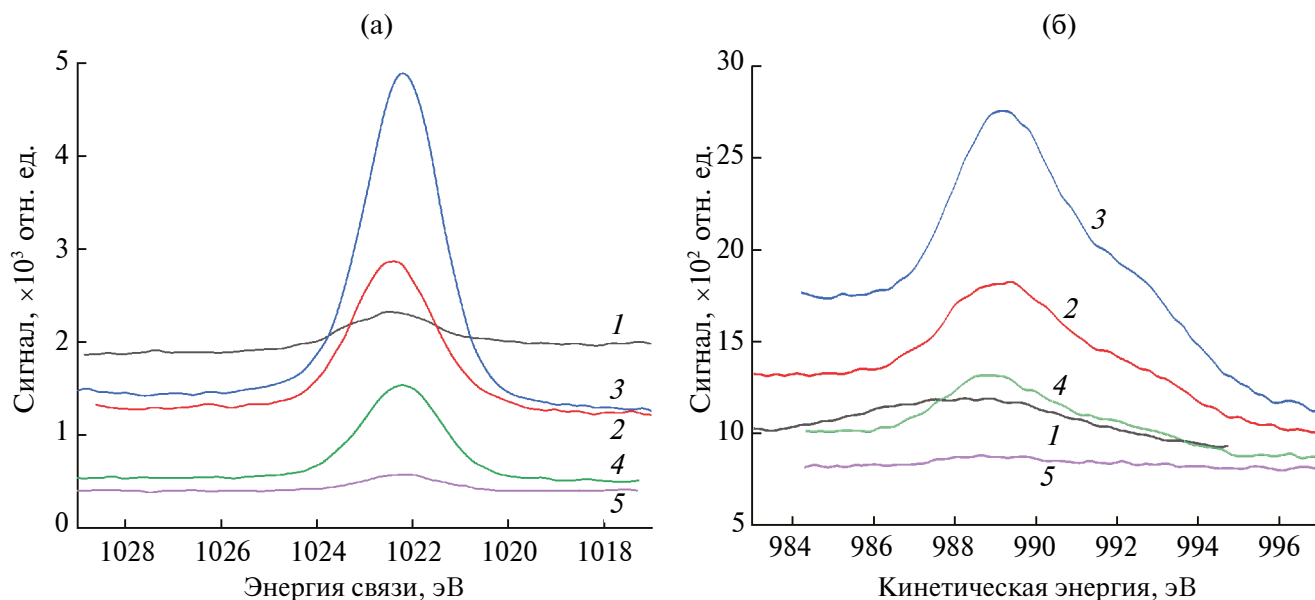


Рис. 7. РФЭС (а) и оже-спектры (б) состояния $Zn2p^{3/2}$ и перехода $L_3M_{45}M_{45}$ образца после имплантации, полученные от области на глубине 0 (1); 5.3 (2); 23.9 (3); 45.1 (4); 55.7 (5).

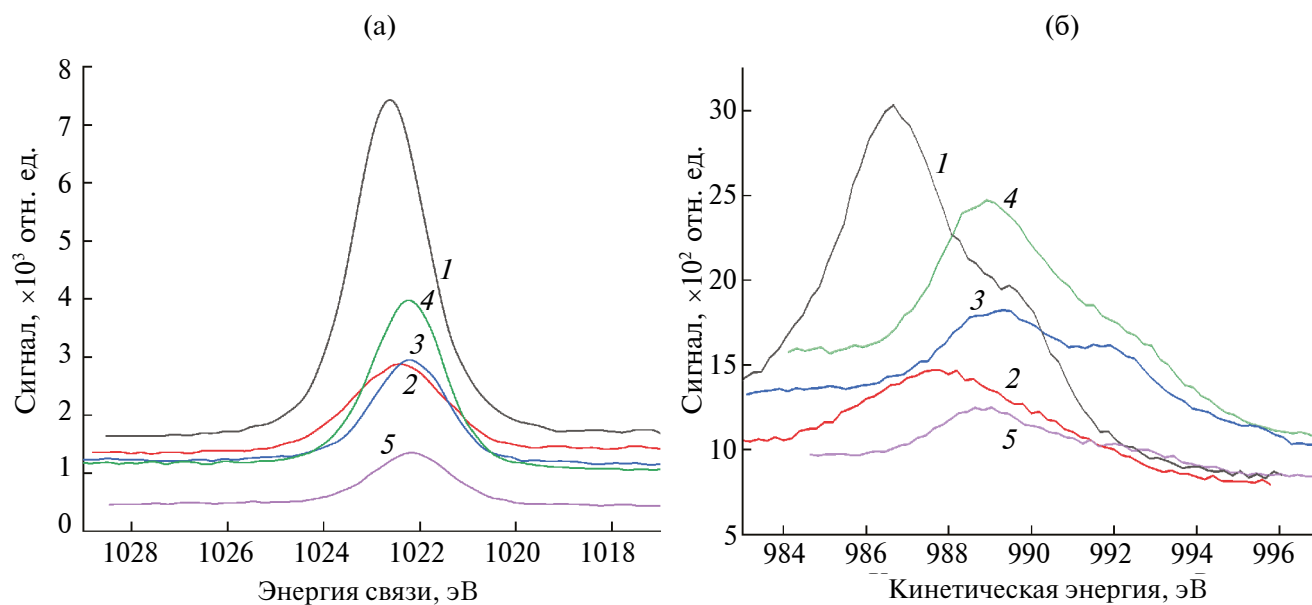


Рис. 8. РФЭС (а) и оже-спектры (б) состояния $Zn2p^{3/2}$ и перехода $L_3M_{45}M_{45}$ образца после отжига при 700°C , полученные от области на глубине 0 (1); 2.7 (2); 13.3 (3); 29.2 (4); 50.4 (5).

изменяется от 986.7 до 988.8 эВ. Это увеличение энергии расположения максимума оже-спектра свидетельствует об уменьшении положительного заряда цинка. Для этого образца оже-параметр состояния $2p^{3/2}$ и перехода $L_3M_{45}M_{45}$ существенного ниже, чем у образца после имплантации, т.е. в данном случае положительный заряд цинка выше, чем после имплантации, и имеет заряд 2^+ .

Используемый в настоящей работе метод РФЭС, как известно, практически на всех по-

верхностях обнаруживает углерод [24]. По своей природе это — адсорбированные из воздуха углеводородные соединения, которые часто используют в РФЭС для коррекции шкалы энергии связи. После отжига в окислительной среде при 700°C на поверхности исследуемой пленки нитрида кремния становится меньше адсорбированного углерода из-за его выгорания. Уменьшение количества адсорбированного углерода при отжиге не влияет на свойства самой пленки.

ВЫВОДЫ

После имплантации ионов цинка в пленку нитрида кремния вблизи поверхности пленки, на глубине около 20 нм, были обнаружены кластеры металлического Zn со средним размером около 100 нм. В процессе последовательных этапов отжига на воздухе происходило превращение фазы металлического Zn в фазу, содержащую положительно заряженный ион цинка. После отжига при 700°C на поверхности пленки Si_3N_4 в слое, содержащем адсорбированный кислород, образуются фазы оксида ZnO или силицида цинка Zn_2SiO_4 , а внутри пленки — фазы Zn_3N_2 или ZnSiN_2 . После отжига при 700°C Zn-содержащие нанокластеры также имели средний размер менее 100 нм.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0001 “Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах” (1023032100070-3-1.2.1).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Litton C.W., Collins T.C., Reynolds D.S. Zinc Oxide Materials for Electronic and Optoelectronic Device Application, Wiley, Chichester, 2011.
2. Zain J.H., Ramkumar J., Sankaran C., Tyagi A.K. // Separation Science Technology. 2019. V. 55. Iss. 11. P. 1.
<https://www.doi.org/10.1080/01496395.2019.1617746>
3. Straumal B.B., Mazilkin A.A., Protasova S.G., Myatiev A.A., Straumal P.B., Schütz G., van Aken P.A., Goering E., Baretzky B. // Phys. Rev. B. 2009. V. 79. P. 205206.
<https://www.doi.org/10.1103/PhysRevB.79.205206>
4. Liu Y.X., Liu Y.C., Shen D.Z., Zhong G.Z., Fan X.W., Kong X.G., Mu R., Henderson D.O. // J. Cryst. Growth. 2002. V. 240. P. 152.
5. Urfa Y., Çorumlu V., Altındal A. // Mater. Chem. Phys. 2021. V. 264. P. 124473.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124473>
6. Sirelkhatim A., Mahmud S., Seeni A., Kaus N.H.M., Ann L.C., Bakhori S.K.M., Habsah H., Dasmawati M. // Nano-Micro Lett. 2015. V. 7. P. 219.
<https://www.doi.org/10.1007/s40820-015-0040-x>
7. Inbasekaran S., Senthil R., Ramamurthy G., Sastry T.P. // Intern. J. Innov. Res. Sci. Engineer. Technol. 2014. V. 3. Iss. 1. P. 8601.
8. Smestad G.P., Gratzel M. // J. Chem. Educ. 1998. V. 75. P. 752.
9. Amekura H., Takeda Y., Kishimoto N. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2004. V. 222. P. 96.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.01.003>
10. Yang J., Liu X., Yang L., Wang Y., Zhang Y., Lang J., Gao M., Wei M. // J. Alloys Compd. 2009. V. 485. P. 743.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.06.070>
11. Shen Y., Li Z., Zhang X., Zhang D., He W., Xue Y., Gao Y., Zhang X., Wang Z., Liu C.L. // Optical. Mater. 2010. V. 32. Iss. 9. P. 961.
<https://www.doi.org/10.1016/j.optmat.2010.01.033>
12. Zatsepin D., Zatsepin A., Boukhvalov D.W., Kurmaev E.Z., Pchelkina Z.V., Gavrilov N.V. // J. Non-Cryst. Solids. B. 2016. V. 432. P. 183.
<https://www.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2015.10.002>
13. Tereshchenko A.N., Privezentsev V.V., Firsov A.A., Kulikauskas V.S., Zatekin V.V., Voronova M.I. // J. Surf. Investig.: X-ray, Synchr. Neutr. Tech. 2023. V. 17. P. 1232.
<https://www.doi.org/10.1134/S1027451023060198>
14. Gwyddion Programm. (2021) Czech Metrology Institute. <http://gwyddion.net>
15. National Institute of Standards and Technology. (2000) Gaithersburg, USA.
<https://www.nist.gov>
16. Moulder J.F. Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy. Physical Electronics, 1995. 230 p.
17. Монахова Ю.Б., Муштакова С.П. // Журнал аналит. химии. 2012. Т. 67. № 12. С. 1044.
18. Пирс К., Адамс А., Кац Л., Цай Дж., Сейдел Т., Макгуиллис Д. Технология СБИС, в 2-х книгах. / Ред. Зи С.М. Пер. с англ. М.: Мир, 1986.
19. Futsuhara M., Yoshioka K., Takai O. // Thin Solid Films. 1998. V. 322. P. 274.
20. Coelho-Jún H., Silva B.G., Labre C., Loreto R.P., Sommer R.L. // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 3248.
21. Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Ред. Бриггс Д., Сих М.П. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 181 с.
22. MultiPak software.
<https://multipak.software.com>
23. Thermo Fisher Scientific. (2024) Thermo Fisher Scientific Inc., USA.
<https://www.thermofisher.com/>
24. Barr T.L., Seal S. // J. Vacuum Sci. Technol. A. 1995. V. 13. Iss. 3. P. 1239. <https://doi.org/10.1116/1.579868>

STUDY OF ZINC IMPLANTED SILICON NITRIDE FILM

V. V. Privezentsev^{1,*}, A. A. Firsov¹, V. S. Kulikauskas², D. A. Kiselev³,
B. R. Senatulin³

¹Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117218 Russia

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

³National University of Science and Technology "MISiS", Moscow, 119049 Russia

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

The results of a study of nanoclusters at the interface of a Si_3N_4 film on a Si substrate implanted with $^{64}\text{Zn}^+$ ions with a dose of $5 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ and energy of 40 keV are presented. The Si_3N_4 film was deposited on a silicon substrate using the gas-phase method. Then the implanted samples were annealed in air in steps of 100°C for 1 hour at each step in the temperature range of $400\text{--}700^\circ\text{C}$. The surface morphology of the samples was studied using scanning probe microscopy. The profiles of the implanted impurity and film elements, as well as the chemical state of the Zn ion, were studied using X-ray photoelectron and Auger electron spectroscopy. The shock pulse method revealed that after implantation, individual metallic zinc nanoclusters with a size of about 100 nm or less were detected near the surface of the Si_3N_4 film. During the annealing process, they grow with simultaneous transformation into the ZnSiN_2 phase and, possibly, into the phases of zinc oxide and silicide near the surface. After annealing at a temperature of 700°C , Zn-containing nanoclusters with a size of about 100 nm are formed in the Si_3N_4 film.

Keywords: silicon substrate, Si_3N_4 film, zinc implantation, nanoclusters, annealing in an oxidizing environment, zinc oxide.