

УДК 533.537

ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ O_2^+ НА ЭЛЕМЕНТНЫЙ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТИ Si(111)

© 2024 г. Г. Х. Аллаярова^{а, *}, Б. Е. Умирзаков^б, А. К. Ташатов^а

^аКаршинский государственный университет, Карши, 180117 Узбекистан

^бТашкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095 Узбекистан

*e-mail: allayarova5030@mail.ru

Поступила в редакцию 14.10.2023 г.

После доработки 20.01.2024 г.

Принята к публикации 20.01.2024 г.

С использованием методов вторичной ионной масс-спектрометрии, спектроскопии упруго отраженных электронов и оже-электронной спектроскопии изучены элементный и химический составы поверхности, концентрационные профили распределения атомов по глубине кремния, имплантированного ионами O_2^+ с энергией $E_0 = 1$ кэВ при дозе $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Установлено, что в легированном ионами слое образуются оксиды и субоксиды Si (SiO_2 , Si_2O и $SiO_{0.5}$), а также содержатся несвязанные атомы O и Si. Постимплантационный отжиг при 850–900 К приводил к формированию слоя стехиометрического SiO_2 толщиной $\sim 25\text{--}30 \text{ \AA}$.

Ключевые слова: ионная имплантация, нанопленки, нанофазы, доза ионов, работа выхода, ширина запрещенной зоны, фотоэлектроны.

DOI: 10.31857/S1028096024050117, EDN: FTPIKG

ВВЕДЕНИЕ

Тонкие пленки SiO_2 и структуры на их основе широко используются при создании МОП–транзисторов (МОК – металл–оксид–полупроводник), дисплеев, диодов и интегральных схем, светоизлучающих структур, солнечных элементов. В настоящее время хорошо изучены состав, электронные и оптические свойства пленок SiO_2 и субоксидов Si, выращенных на поверхности Si различными методами [1–11]. В частности, в [7] показано, что в матрице SiO_2 гидрированного аморфного субоксида Si появляются избыточные атомы Si и образуются нанокластеры Si. В кластерах с размерами меньше 50–100 нм проявляются квантово-размерные эффекты [7]. Начиная с размера кластера 10 нм постоянная кристаллической решетки кремния увеличивается [8]. Как показано в [9], при увеличении толщины пленки до 100 нм происходит ее самопроизвольная кристаллизация. Наличие нанокластеров кремния в $\alpha\text{-}SiO_x$ ($0 < x < 2$) обеспечивает излучение видимого и инфракрасного света при комнатной температуре [10].

В последнее годы метод низкоэнергетической имплантации ионов широко используют для получения наноразмерных структур на поверхностных слоях материалов различной природы [11, 12]. В частности, на основе Si получены и изучены электронные и оптические свойства наноразмерных фаз и пленок силицидов металлов и SiO_2 [13–18]. Однако до настоящего времени практически не были исследованы изменение состава и структуры поверхностных слоев Si как в процессе имплантации ионов O_2^+ , так и последующего отжига. Настоящая работа посвящена решению этой очень актуальной проблемы физической электроники.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследования использованы монокристаллические образцы Si(111). Эксперименты проводили в сверхвысоковакуумном ($P \approx 10^{-7}$ Па) приборе, состоящем из двух камер и собранном на основе установки УСУ [19]. В первой камере проводили термический отжиг и ионную

бомбардировку Si, а во второй камере исследовали состав, структуру и свойства образцов с использованием методов оже-электронной спектроскопии, спектроскопии упруго отраженных медленных электронов. На рис. 1 приведена конструкция пушки ионов O_2^+ . Кислород напускали в сверхвысоковакуумный прибор через специальный натекаль. Ионизацию кислорода осуществляли бомбардировкой ионами кислорода. Источник ионов помещали в магнитное поле соленоида. Он состоял из нити накала и анода. Источник ионов работал при давлении газов 10^{-2} Па, а в из-

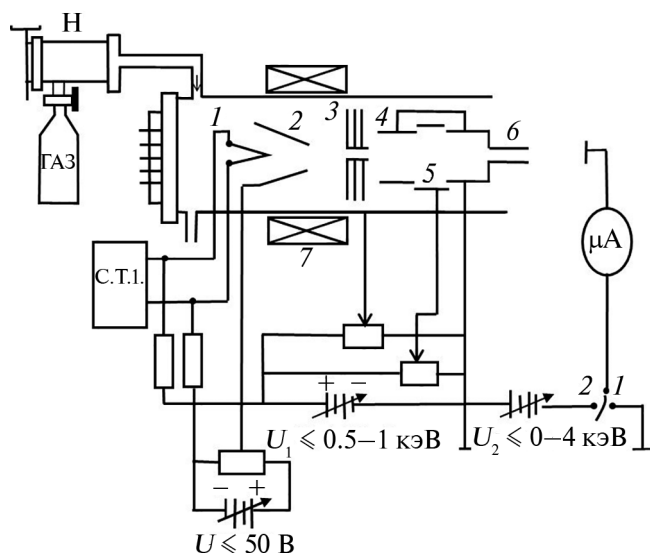


Рис. 1. Конструкция ионной пушки для создания пучка ионов газов: 1 – нить накала; 2 – анод; 3 – система диафрагм; 4–6 – фокусирующие и ускоряющие электроды.

мерительной части прибора давление составляло 10^{-6} Па. Для ускорения электронов между нитью накала и анодом подавали напряжение порядка 50 В. Плотность тока ионов на мишень составляла $(1-10) \times 10^{-6}$ А·см $^{-2}$ [19]. Масс-спектры записывали при бомбардировке образца ионами Cs^+ с $E_0 = 6.7$ кэВ на стандартной установке типа МИ-1320. Профили распределения атомов по глубине образцов исследовали методом оже-электронной спектроскопии в сочетании с травлением поверхности ионами Ag^+ с $E_0 = 1$ кэВ под углом 15° относительно поверхности. Перед ионной имплантацией образцы Si(111) обезгаживали при 1200 К в течение 4–5 ч и кратковременном отжиге при 1500 К в сочетании с мягким травлением поверхности ионами Ag^+ .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведен масс-спектр отрицательных ионов для Si, имплантированного ионами O_2^+ с $E_0 = 1$ кэВ при дозе облучения $D = D_n = 6 \times 10^{16}$ см $^{-2}$, где D_n – доза насыщения, при которой дальнейшее ее увеличение не приводит к изменению состава ионно-имплантированных слоев. Видно, что в спектре содержатся интенсивные пики SiO_2^- , субоксидов Si (SiO и Si_2O) и несвязанных атомов Si и O. Наряду с этими пиками обнаруживаются малоинтенсивные пики различных примесных атомов, общая концентрация которых не превышает 0.1 ат. %. Отжиг этой системы приводит к изменению содержания оксидов, и при ~ 900 К формируется нанопленка SiO_2 толщиной $\sim 25-30$ Å (рис. 3). Значение энергии связи основного уров-

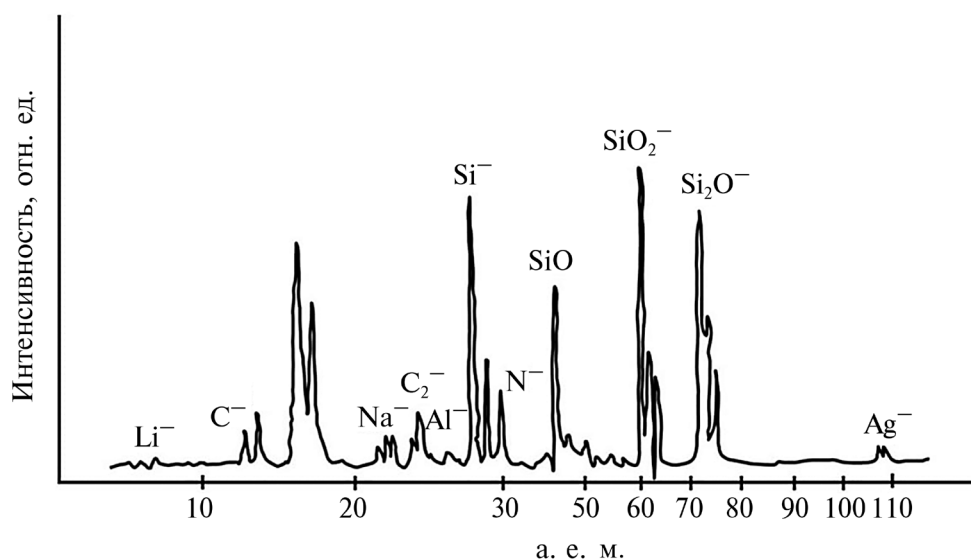


Рис. 2. Масс-спектр Si, имплантированного ионами O_2^+ с $E_0 = 1$ кэВ при $D = 6 \times 10^{16}$ см $^{-2}$, измеренный при бомбардировке ионами Cs^+ с $E_0 = 6.7$ кэВ.

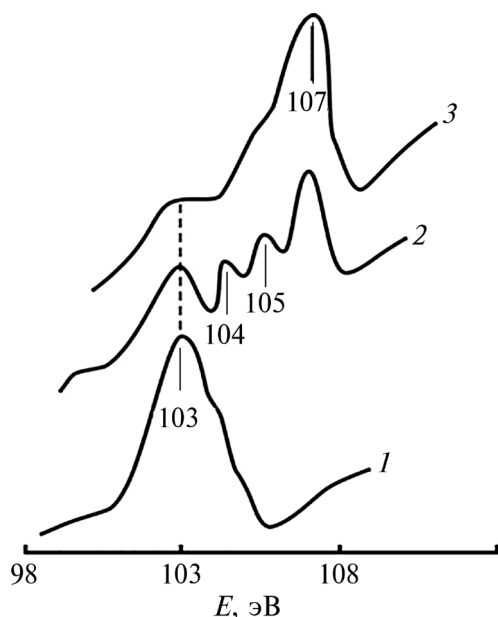


Рис. 3. Спектры упруго отраженных электронов $L_{23}VV$ Si: 1 — чистого; 2 — после имплантации ионов O_2^+ с $E_0 = 1$ кэВ и $D = 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, 3 — после отжига при 900 К в течение 30 мин.

ня L_{23} кремния очень чувствительно к изменению состава в поверхностном слое Si. Образование новых соединений или их разложение приводит к изменению формы и положения этого пика. Из рис. 3 видно, что при имплантации ионов O_2^+ в Si с $E_0 = 1$ кэВ при дозе $D = D_n$ в спектре упруго отраженных медленных электронов интенсивность пика L_{23} кремния резко уменьшается и появляются новые интенсивные пики при энергии 104, 105.5 и 107 эВ (рис. 3, кривая 2). Появление этих пиков объясняется наличием нестехиометрических оксидов SiO, Si_2O и SiO_2 соответственно. После отжига ионно-имплантированного образца при 900 К пики при энергии 104 и 105.5 эВ полностью исчезают, а интенсивность пика при $E \approx 107$ эВ резко увеличивается. На основе анализа данных методов оже-электронной спектроскопии и вторичной ионной масс-спектрометрии установлено, что на поверхности формируется однородная пленка SiO_2 толщиной 25–30 Å (эти данные на рисунке не показаны).

На рис. 4 приведены изменения по глубине общей концентрации O и концентрации атомов O, образующих связи типа SiO_2 и SiO_x ($SiO + SiO_{0.5}$) для Si, имплантированного ионами O_2^+ с $E_0 = 1$ кэВ при $D = 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Максимальная концентрация O, содержащегося на поверхности ионно-имплантированного Si, принята за 100 ат. %. Видно, что кривые $C_O(d)$ для SiO_2 и SiO_x проходят через максимумы. Общая концентрация O до глу-

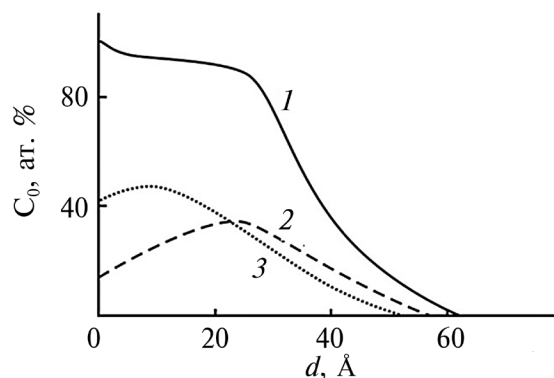


Рис. 4. Зависимости концентрации атомов кислорода $C_O(d)$ для Si, имплантированного ионами O_2^+ с $E_0 = 1$ кэВ: 1 — общая концентрация; 2 — в оксиде SiO_2 ; 3 — в соединении SiO_x ($SiO + SiO_{0.5}$).

бины 20–25 Å заметно изменяется, из них до 70–75 ат. % образуют химическую связь с атомами Si. После отжига при 900 К все атомы O и Si образуют химическую связь и формируются пленки SiO_2 с достаточно хорошей стехиометрией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что при имплантации ионов O_2^+ с $E_0 = 1$ кэВ и дозе $D = 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в приповерхностном слое образуются нестехиометрические оксиды типа Si_xO_y . В этих слоях также содержатся несвязанные атомы Si и O, общая концентрация которых составляет 25–30 ат. %. Профили распределения оксидов SiO_2 и SiO_x по глубине проходят через максимум. Отжиг при 900 К приводит к формированию однородную пленку SiO_2 толщиной ~25–30 Å.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство этим конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидов Е.С., Михайлов А.Н., Белов А.И., Карзанова М.В., Демидова Н.Е., Чигиринский Ю.И., Шушуннов А.Н., Тетельбаум Д.И., Горшков О.Н., Европейцев Е.А. // ФТТ. 2011. Т. 53. Вып. 12. С. 2294. <http://journals.ioffe.ru/articles/1645>
2. Громов Д.Г., Пятилова О.В., Булянский С.В., Белов А.Н., Раскин А.А. // ФТТ. 2013. Т. 55. Вып. 3. С. 562. <http://journals.ioffe.ru/articles/973>

3. Hoppe K., Fahrner W.R., Fink D., Dhamodoran S., Petrov A., Chandra A., Saad A., Faupel F., Chakravadhanula V.S.K., Zaporotchenko V. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2008. V. 266. № 8. P. 1642.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.12.069>
4. Rochet F., Dufour G., Roulet H., Pelloie B., Perriere J., Fogarassy E., Slaoui A., Froment M. // Phys. Rev. B. 1988. V. 37. № 11. P. 6468.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.37.6468>
5. Takeoka S., Fujii M., Hayashi S. // Phys. Rev. B. 2000. V. 62. № 24. P. 16820.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.16820>
6. Krishnan R., Xie Q., Kulik J., Wang X.D., Lu S., Molinari M., Gao Y., Krauss T.D., Fauchet P.M. // J. Appl. Phys. 2004. V. 96. № 1. P. 654.
<https://doi.org/10.1063/1.1751632>
7. Ундалов Ю.К., Теруков Е.И. // ФТП. 2015. Т. 49. Вып. 7. С. 887.
<http://journals.ioffe.ru/articles/41958>
8. Зинченко В.Ф., Лаврентьев К.В., Емельянов В.В., Емельянов В.В., Ватуев А.С. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 2. С. 30.
9. Гусев О.Б. // ФТП. 2013. Т. 47. Вып. 2. С. 147.
10. Allayarova G.X. // J. Surf. Invest. X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2022. V. 16. № 6. P. 1171.
<https://doi.org/10.1134/S1027451022060039>
11. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Gulyamova S.T., Allayarova G.X. // Tech. Phys. 2020. V. 65. № 5. P. 795.
<https://doi.org/10.1134/S1063784220050242>
12. Tashmukhamedova D.A., Yusupjanova M.B., Allayarova G.X., Umirzakov B.E. // Tech. Phys. 2020. V. 46. № 10. P. 972.
<https://link.springer.com/article/10.1134/S1063785020100144>
13. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Ruzibayeva M.K., Djurabekova F.G., Danaev S.B. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2014. V. 326. P. 322.
14. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Boltaev K.K., Dzhurakhalov A.A. // Mater. Sci. Engin. 2003. V. 101. P. 124.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X14001670>
15. Tashmukhamedova D.A., Yusupjanova M., Allayarova G.Kh., Umirzakov B.E. // Tech. Phys. Lett. 2020. V. 46. № 10. P. 972.
<https://doi.org/10.1134/S1063785020100144>
16. Соболев Н.А., Калядин А.Е., Штельмах К.Ф., Шек Е.И. // ФТП. 2021. Т. 55. Вып. 10. С. 928.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2021.10.51446.9694>
17. Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Kavetskiy T.S., Osin Y.N. // Rev. Adv. Mater. Sci. 2015. V. 40. P. 155.
18. Christian R., Frank F., Ralph M. // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 205701.
<https://doi.org/10.1063/1.4936223>
19. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. // Журн. технической физики. 2013. Т. 83. Вып. 6. С. 66.
<https://doi.org/10.52304/v22i3.153>

Effect of O_2^+ Ion Implantation on the Elemental and Chemical Composition of the Si(111) Surface

G. Kh. Allayarova^{1, *}, B. E. Umirzakov², A. K. Tashatov¹

¹Karshi State University, Karshi, 180117 Uzbekistan

²Tashkent State Technical University, Tashkent 100095 Uzbekistan

*e-mail: allayarova5030@mail.ru

Using the methods of secondary ion mass spectrometry, elastic peak electron spectroscopy and Auger electron spectroscopy, the elemental and chemical composition of the surface, concentration profiles of the distribution of atoms over the depth of silicon implanted with O_2^+ ions with energy $E_0 = 1$ keV at a dose of $D = 6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ were studied. It was found that oxides and suboxides of Si (SiO_2 , Si_2O and $\text{SiO}_{0.5}$) were formed in the ion-doped layer, and it also contained unbound O and Si atoms. Post-implantation annealing at 850–900 K led to the formation of a stoichiometric SiO_2 layer ~25–30 Å thick.

Keywords: ion implantation, nanofilms, nanophases, ion dose, work function, band gap, photoelectrons.