

Исследование изменения кристаллической структуры поверхности Si(111) при ионной бомбардировке и последующего отжига

© С.Ж. Ниматов,¹ Б.Е. Умирзаков,¹ Ф.Я. Худайкулов,¹ Д.С. Руми²

¹Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова,
100095 Ташкент, Узбекистан

²НТП „PROTON“,
100007 Ташкент, Узбекистан
e-mail: Nimatov@mail.ru

Поступило в Редакцию 29 ноября 2018 г.

В окончательной редакции 29 ноября 2018 г.

Принято к публикации 10 апреля 2019 г.

Представлены результаты исследования модификации поверхности Si(111) при бомбардировке ионами щелочных элементов в сочетании с отжигом и показано, что при энергии ионов в интервале 0.3–1 keV после прогрева на поверхности Si формируется монослойное покрытие силицида металла. Установлено, что работа выхода ϕ поверхности образца Si(111) сложным образом зависит от дозы при различных энергиях облучения и типах ионов.

Ключевые слова: ионная бомбардировка, отжиг, монослойная пленка, структура, работа выхода.

DOI: 10.21883/JTF.2019.10.48181.414-18

Введение

С развитием технологий нанопленочной электроники актуальными становятся вопросы исследования модификации поверхности различных материалов, в особенности полупроводниковых пленок пучками низкоэнергетических ионов. Под действием ионного пучка наблюдается целый ряд взаимоперекрывающихся элементарных процессов: распыления, диссоциации, десорбции, адсорбции, гомо- и гетерогенных химических образований на поверхности. В частности, происходит эффективная ионно-стимулированная десорбция углерода, кислорода и других загрязнений поверхности, что способствует очистке границы раздела, улучшению адгезии пленки с материалом подложки и формированию тонкого слоя, состоящего из атомов подложки и легирующего элемента. Все это приводит к изменению вторично эмиссионных, фотоэлектрических, оптоэлектронных и других ее свойств, которые стимулированы как самим ионным пучком, так и его влиянием на образование или исчезновение дефектов, способствующее зародышеобразованию, эпитаксиальному или аморфному росту слоев на поверхности [1–4].

В настоящее время хорошо изучены изменение состава, структуры и физические свойства поверхностей Si, GaAs, CaF₂, при бомбардировке ионами активных металлов в сочетании с термическим и лазерным отжигом. В частности, на поверхности и приповерхностной области Si получены наноразмерные фазы и пленки силицидов металлов, изучены их кристаллическая структура и электронные свойства [5–7].

Однако до настоящего времени не проведены исследования, направленные на получение монослойных кристаллических структур силицидов металлов на поверх-

ности Si методом ионной имплантации и последующего отжига. Поэтому основной целью настоящей работы являлось изучение процессов формирования монослойных покрытий силицидов металлов на поверхности Si и ее влияние на эмиссионные свойства кремния.

Методы и условия эксперимента

Методом дифракции медленных электронов (ДМЭ) одновременно в вариантах электронографии и измерения интенсивностей рефлекса и фона дифракционной картины определены тип и параметры кристаллических решеток, и оценена степень структурного совершенства растущих пленок [8]. Исследования проведены в сверхвысоком вакууме $5 \cdot 10^{-8}$ Па. Экспериментальная установка, в которой смонтированы электронно-оптические системы ДМЭ, ОЭС, ионная пушка и другие вспомогательные устройства, позволяет проводить эксперименты (ионная имплантация, отжиг, измерение) в одинаковых условиях. Разработанный манипулятор-гонометр дает возможность с точностью долей миллиметра установить исследуемый образец относительно электронно-оптических систем ДМЭ, ОЭС, ионной пушки и проводить нагрев, а также контроль его температуры.

Результаты эксперимента и их обсуждение

При низкоэнергетической ионной бомбардировке ($E_i \leq 1-2$ keV) часть ионов осаждается на поверхности, а другая часть внедряется вглубь мишени. Эксперименты по бомбардировке тщательно очищенной высокотемпературным прогревом поверхности Si(111) показали, что

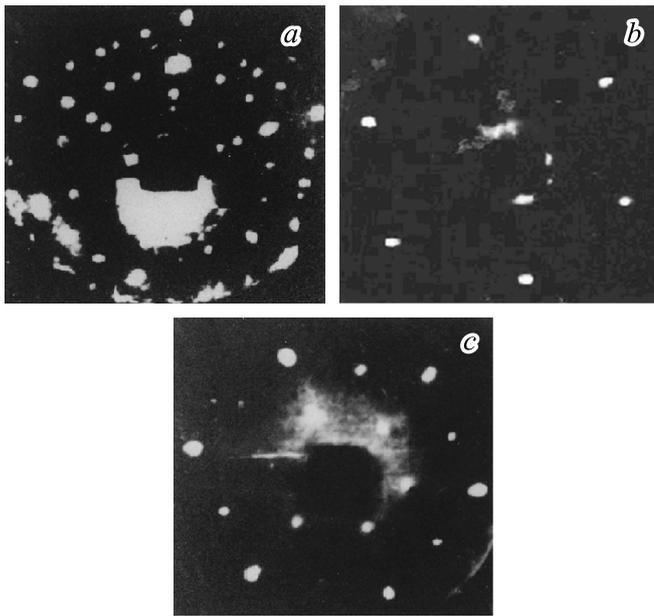


Рис. 1. Сверхструктуры на поверхности образца Si(111) при облучении различными ионами: *a* — $\text{Li}^+ \rightarrow \text{Si}(111)$ ($E_i = 400 \text{ eV}$, $T = 900 \text{ K}$), Si(111)– $4 \times 4 \text{ Li}$; *b* — $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Si}(111)$ ($E_i = 400 \text{ eV}$, $T = 400 \text{ K}$), Si(111)– $1 \times 1 \text{ Na}$; *c* — $\text{Rb}^+ \rightarrow \text{Si}(111)$ ($E_i = 600 \text{ eV}$, $T = 850 \text{ K}$), Si(111)– $2 \times 2 \text{ Rb}$.

в области энергии щелочных ионов $E_i = 300\text{--}1000 \text{ eV}$ имеет место деградация картины ДМЭ и преимущественное осаждение пленки из ионного пучка. При комнатной температуре подложки время до полного исчезновения дифракционных рефлексов картины ДМЭ сравнимо с временем накопления на поверхности щелочного металла с концентрацией 10^{15} cm^{-2} . Нами впервые показано, что после отжига ионно-имплантированных образцов Si при определенных температурах на поверхности формируется монослойная пленка силицида металла с определенной кристаллической структурой (рис. 1). На рис. 2 приведены зависимости температуры отжига от энергии ионов Li^+ , Na^+ и Rb^+ , при которых образуются сверхструктуры силицидов. Полученные кривые показывают низкотемпературную (350–600 K) и высокотемпературную (700–900 K) области перегиба, характеризующие физико-химическое различие поверхностной системы. Для низкотемпературной области характерны низкие энергии бомбардирующих ионов, отсутствие поверхностных структур и химических реакций. Для высокотемпературной области характерны относительно высокие энергии бомбардирующих ионов, наличие поверхностных структур и образование химических соединений. Температура отжига, при которой восстанавливаются дифракционные картины, зависит от сорта ионов и их энергии (рис. 2). Увеличение температуры отжига в области энергий от 250 до 1000 eV мы связываем с ростом концентрации дефектов Френкеля,

количество которых стремится к равновесному. Области перегиба смещаются по шкале энергий в сторону меньших значений при увеличении массы бомбардирующих ионов. Исключением является кривая для ионов Li^+ , что связано с легким внедрением атомов лития в приповерхностные слои и требуется дополнительный нагрев для диффузии Li из внутренних слоев, накопления на поверхности и образования новой структуры.

На рис. 3 приведены зависимости работы выхода ϕ от дозы облучения D , рода ионов и начальных поверхностных структур с плавными изменениями кривых и проходящих через минимум при концентрации адатомов менее одного монослоя и достигая насыщения около двух монослоев. Время полного исчезновения дифракционных рефлексов для различных ионов совпадает с выходом кривой $\phi = f(D)$ на насыщение. При этом значение ϕ близко к значениям для массивных щелочных металлов. Слой, нанесенный пучком ионов с энергией до $\sim 300 \text{ eV}$, легко удалялся кратковременным прогревом при 500–600 K, после чего дифракционная интенсивность основных рефлексов и ϕ восстанавливаются до первоначального значения.

При проведении постимплантационного отжига аморфизированных поверхностей было установлено, что структурное совершенство эпитаксиальных пленок силицидов в $\sim 1.5\text{--}2$ раза выше, чем у исходной поверхности подложки. При высокотемпературном нагреве силицида, остывании подложки и возврате к исходной структуре Si(111)–(1 × 1) наблюдалось также снижение степени дефектности d по сравнению с d_{initial} . Мы относим этот эффект за счет механизма радиационно-стимулированной релаксации („залечивания“) дефектов поверхности при протекающих на ней физико-химических процессах силицидообразования. Ориентированный рост слоев сопровождается наличием следу-

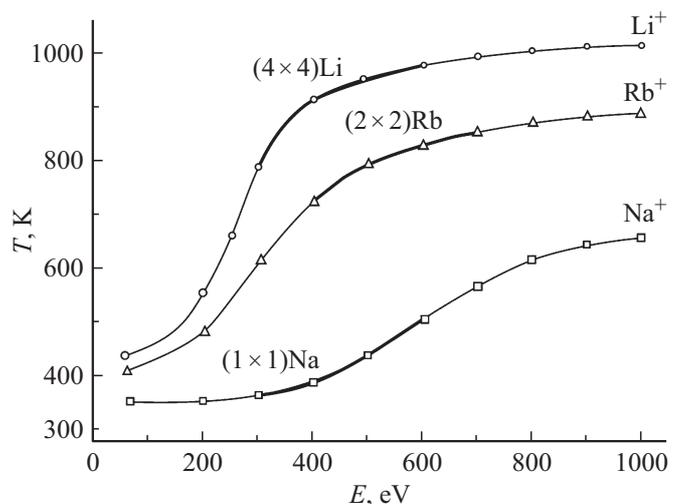


Рис. 2. Зависимость температуры отжига T от рода и энергии бомбардирующих ионов, при которой восстанавливается дифракционная картина. Жирными линиями выделены области существования силицидов.

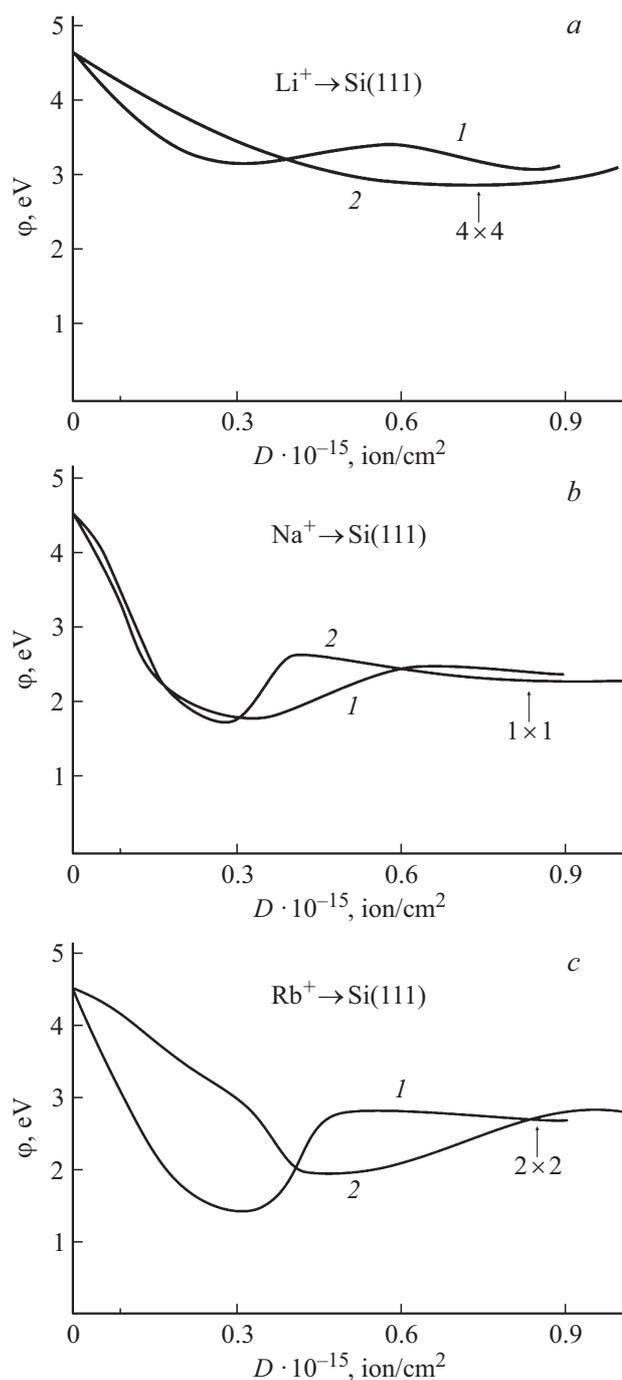


Рис. 3. Дозовая зависимость работы выхода ϕ поверхности образца Si(111) при облучении различными ионами, E_i : 1 — 300, 2 — 700 eV.

ющих факторов. Ионный пучок стимулирует образование точечных центров роста, активирует диффузионные процессы, очищает поверхность от чужеродных адсорбированных атомов, разрушает образующиеся трехмерные островки и способствует испарению мелких островков, что в свою очередь, приводит к пересыщению двумерного пара вблизи поверхности. В сочетании с термообработкой это способствует осуществлению реакций

с упорядочением новой фазы силицида. Данный вывод может иметь практическое значение при отработке технологических режимов активировки полупроводниковых кристаллов, получении нанопленочных структур для создания приборов нано- и оптоэлектроники. Образование силицидов щелочных металлов в поверхностном слое позволяет получать вторично-эмиссионные свойства, мало изменяющихся в широком диапазоне температур.

Таким образом, показано, что низкоэнергетическая ионная бомбардировка в сочетании с отжигом позволяет получить на поверхности Si(111) монослойные пленки силицидов металлов с различной кристаллической структурой. Определены интервалы энергии и температуры отжига, при которых происходит образование сверхструктуры силицидов металлов. В области энергии бомбардирующих ионов щелочных металлов до 300 eV превалирует доля неупругих взаимодействий, приводящих к захвату частиц из ионного пучка без образования силицида металла. В области энергии ионов $E_i = 300\text{--}1000$ eV увеличивается доля упругого взаимодействия, в результате увеличивается концентрация дефектов радиационного смещения. При этом ионная бомбардировка в сочетании с термообработкой стимулирует процессы низкотемпературной радиационно-стимулированной реакции на поверхности с упорядочением новой фазы. При $E_i \approx 1\text{--}3$ keV ионы преимущественно внедряются в приповерхностную область и после прогрева формируют несколько слоев силицидов металлов.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке фонда фундаментальных исследований Республики Узбекистан (проект Ф2-53).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликтов интересов.

Список литературы

- [1] Pelaz L., Marqués L.A., Barbolla J. // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 96. N 11. P. 5947–5976.
- [2] Nord J., Nordlund K., Keinonen J. // Abstracts of 19th International conference on atomic collisions in solids. 2001. Paris, 29 July–3 August. P. 110.
- [3] Shoji E., Shimoji H., Morimoto S. и др. // Abstracts of 19th International conference on atomic collisions in solids. 2001. Paris, 29 July–3 August. P. 200.
- [4] Шемухин А.А., Балакшин Ю.В., Черныш В.С., Патракеев А.С. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 19. С. 83–89. [Shemukhin A.A., Balakshin Yu V., Chernysh V.S., Patrakeev A.S., et al. // Tech. Phys. Lett. 2012. Vol. 38. N 10. P. 907–909.]

- [5] *Ниматов С.Ж., Руми Д.С.* // XXII Междунар. конф. по взаимодействию ионов с поверхностью. „ВИП-2015“. М. 2015. Т. 2. С. 152–155.
- [6] *Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Рузибаева М.К., Ташатов А.К., Донаев С.Б., Мавлянов Б.Б.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 9. С. 146–149. [*Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Ruzibaeva M.K., Tashatov A.K., Donaev S.B., Mavlyanov B.B.* // Tech. Phys. 2013. Vol. 58. N 9. P. 1383–1386.]
- [7] *Громов Д.Г., Пятилова О.В., Булярский С.В., Белов А.Н., Раскин А.А.* // ФТТ. 2013. Т. 55. Вып. 3. С. 562–566.
- [8] *Руми Д.С., Ниматов С.Ж., Атабаев Б.Г., Гарафутдинова И.А.* // УФЖ. 2001. № 3–4. С. 205–209.