РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Влияние состава пучка кластерных ионов на дефектообразование в мишени

А. Е. Иешкин[1,a], А. А. Шемухин[2], Ю. А. Ермаков[2], В. С. Черныш[1,2]

[1] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники.*

[2] *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ). Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

E-mail: [a] *ieshkin@physics.msu.ru*

Статья поступила 25.11.2015, подписана в печать 08.12.2015.

Исследовано образование дефектов в пленках кремния на сапфире под действием облучения пучком газовых кластерных ионов аргона с энергией 30 кэВ. С помощью методики обратного резерфордовского рассеяния в режиме каналирования обнаружено образование существенного количества дефектов в объеме образца при облучении не сепарированным по массе пучком кластерных ионов. При удалении из пучка атомарных и легких кластерных ионов осуществляется бездефектное травление образцов.

Ключевые слова: кластерные ионы, кремний на сапфире, распыление, аморфизация, планаризация, РОР.

УДК: 539.534.9. PACS: 36.40.–c, 68.49.Sf.

Введение

В последнее десятилетие среди ионно-пучковых методик модификации и исследования поверхности активно развивается направление, связанное с использованием газовых кластерных ионов. Газовые кластеры содержат от нескольких атомов до нескольких десятков тысяч атомов, связанных силами Ван-дер-Ваальса. Характерная энергия такой связи составляет десятки мэВ, что существенно меньше энергии химической связи. При ионизации электронным ударом кластерный ион приобретает заряд, составляющий несколько единиц элементарного заряда, и затем ускоряется обычно до энергий 1–30 кэВ. При этом за счет большого размера кластера энергия составляющих кластер атомов значительно меньше энергии ионов мономеров, ускоренных до такой же энергии. Кроме того, в отличие от атомарных ионов, при ударе ускоренного кластера о поверхность большое количество слабо связанных атомов, составляющих кластер, взаимодействует с как минимум таким же количеством атомов мишени. В результате составляющие кластер атомы не проникают вглубь обрабатываемой поверхности, что обеспечивает отсутствие образования объемных дефектов.

Газовые кластерные ионы уже нашли широкое применение для имплантации вещества на сверхмалые глубины, для ассистирования при нанесении тонких пленок, для придания поверхности гидрофильных/гидрофобных свойств или свойств биосовместимости, в качестве зонда в методике вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) [1]. Отдельного внимания заслуживает их использование для сглаживания рельефа поверхности. За счет специфических угловых распределений распыленного вещества и зависимости коэффициента распыления от угла падения кластера при облучении поверхности кластерными ионами наблюдается уменьшение шероховатости до уровня в несколько ангстрем [2]. При этом важным преимуществом кластерной обработки является отсутствие дефектообразования в мишени. Тем не менее, в ряде промышленных установок для кластерной обработки поверхности масс-селекция пучка ионов не осуществляется. В результате на обрабатываемую поверхность мишени попадают, кроме кластерных ионов, ускоренные атомарные ионы, что может приводить к негативным с точки зрения качества поверхности эффектам.

В настоящее время для производства радиационно-стойких микросхем используются так называемые КНС-структуры: пленки кремния на сапфире [3]. Однако для изготовления электронных приборов с высоким быстродействием толщина кремниевого слоя должна быть не более 100 нм. Проблема получения таких тонких слоев заключается в том, что на ранних стадиях эпитаксиального роста из-за различия параметров кристаллической решетки кремния и сапфира именно в этом слое возникает большое количество структурных дефектов [4]. Наличие таких дефектов является существенным препятствием для производства интегральных схем на основе КНС-структур.

Получить пленки кремния на сапфире с небольшим количество структурных дефектов в интерфейсном слое можно с помощью ионной имплантации в 300 нм пленку и последующего высокотемпе-

ратурного отжига. Ультратонкие пленки кремния получают путем утонения с помощью термического окисления и химического травления [4]. Однако получить 100 нм пленку кремния можно и с помощью ионного травления. Этот способ позволяет проводить утонение пленок, не нарушая вакуумных условий. Поэтому в настоящей работе ставилась задача изучить процесс травления пленок кремния на сапфире пучком кластерных ионов аргона. В частности, для выявления влияния атомарных ионов на качество поверхности исследовалось образование дефектов под действием облучения в двух случаях: при наличии в пучке бомбардирующих частиц кластерных и атомарных ионов и в случае облучения только кластерными ионами.

Эксперимент

Облучение мишеней кластерными ионами аргона с энергией 30 кэВ проводилось на ускорителе кластерных ионов МГУ имени М. В. Ломоносова [5, 6]. Формирование газовых кластеров в этом ускорителе происходит при адиабатическом расширении рабочего газа через сверхзвуковое сопло. Критическое сечение составляет 130 мкм, давление газа на входе в сопло 5 атм. Для уменьшения нагрузки на систему откачки вакуумных камер используется импульсный режим подачи рабочего газа. Образующиеся частицы имеют непрерывное распределение по размерам в диапазоне от атомарных ионов до нескольких тысяч атомов на кластер с максимумом около 800 атомов/кластер. Затем поток нейтральных кластеров ионизируется электронным ударом и ускоряется до заданной энергии.

Для предотвращения попадания на поверхность облучаемого образца атомарных и легких кластерных ионов возможна установка постоянного магнита, обеспечивающего отклонение из пучка ионов с размерами менее 70 атомов/кластер. В отсутствие магнита доля тока атомарных и легких кластерных ионов на образец составляла около 20 % от общего тока. При этом значение плотности тока пучка было 2 мкА/см^2. Дозы облучения выбирались в диапазоне $(1–5) \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$. Давление остаточных газов в камере образца в процессе облучения не превышало 10^{-4} Па.

Мишени представляли собой эпитаксиально выращенные на монокристаллическом сапфире пленки кремния с ориентацией $\langle 100 \rangle$. Толщина пленок составляла 300 нм.

Кристаллическую структуру образцов до облучения и после обработки контролировали с помощью метода резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Запись спектров РОР проводилась с использованием ионов He^+ с энергией 1.7 МэВ на ускорителе AN-2500. Пучок анализирующих ионов падал по нормали к поверхности, угол рассеяния составлял 120°.

На каждом этапе записывались два спектра РОР: в направлении каналирования и в направлении, не содержащем открытых каналов. Отметим, что отношение максимума сигнала обратнорассеяных ионов He^+ в направлении каналирования H_{alighn} к сигналу в направлении, не содержащем открытых каналов, H_{random} характеризует степень кристалличности образца: чем меньше это отношение, тем лучше кристаллическая структура.

Кроме того, часть образца при облучении закрывалась маской и после облучения кластерными ионами толщина удаленного слоя определялась с помощью контактного профилометра.

Результаты и обсуждение

Спектры резерфордовского обратного рассеяния от исходной структуры кремний на сапфире, снятые в направлении, не содержащем открытых каналов, и в направлении каналирования представлены на рис. 1. Отношение $H_{\text{alighn}}/H_{\text{random}}$ в области спектра, соответствующей рассеянию от поверхности пленки кремния, равняется 0.20, что говорит об удовлетворительном качестве кристаллической структуры кремния. Кроме того, видно, что в исходной структуре присутствует сильнодефектная область кремния вблизи границы раздела (каналы 460–480). По данным моделирования обратного рассеяния, выполненного с помощью программы SIMNRA [7], толщина пленки составляет 295 нм, что совпадает с заявленной толщиной.

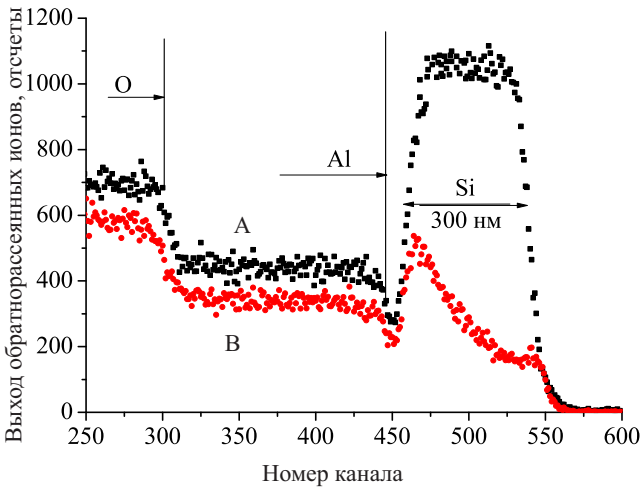

Рис. 1. РОР-спектры исходной пленки кремния на сапфире. А — направление, в котором открытые каналы отсутствуют; В — направление каналирования

Спектры резерфордовского обратного рассеяния от структуры кремний на сапфире, обработанной пучком ускоренных ионов Ar_n^+ в отсутствие масс-сепарации с дозой $4.5 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$, показаны на рис. 2. На спектре, записанном при падении ионов He^+ в направлении, в котором отсутствуют открытые каналы (кривая А), вблизи канала 450, соответствующего границе между кремнием и сапфиром,

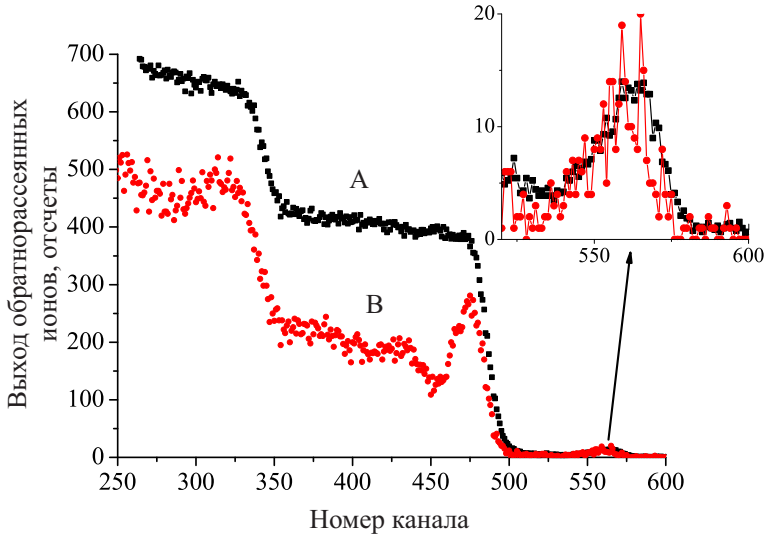

Рис. 2. РОР-спектры образца, обработанного пучком без масс-сепарации. А — направление, в котором открытые каналы отсутствуют; В — направление каналирования

в отличие от аналогичного спектра для исходной структуры, отсутствует провал. Из этого можно сделать вывод о том, что граница была разрушена в результате перемешивания атомных слоев под действием облучения. Кроме того, на спектре, записанном в режиме каналирования (кривая В), в области канала 325, соответствующей сигналу обратнорассеянных ионов от кислорода, входящего в состав сапфира, появился дополнительный пик. Это также свидетельствует о разупорядочении граничных слоев сапфира действием пучка ускоренных ионов в отсутствие масс-сепарации.

Известно, что перемешивание атомных слоев под действием облучения происходит в том случае, если эти слои попадают в область каскадов атомных столкновений, вызванных налетающим ионом. Как моделирование обратного рассеяния, так и данные профилометрических измерений дают значение толщины остаточного слоя кремния 38 нм. По данным моделирования проникновения ионов аргона с энергией 30 кэВ в кремний с помощью программного пакета TRIM [8], эта величина приблизительно равна глубине проникновения ионов. Таким образом, граница раздела сапфир–кремний действительно может подвергаться воздействию атомарных ионов аргона во время облучения.

В высокоэнергетической части спектра присутствует пик вблизи канала 650, который соответствует рассеянию на атомах аргона, проникшего при облучении мишени в объем кремния. На глубину его проникновения в пленке кремния образовались дефекты. Тем не менее, полного разупорядочения в процессе облучения не наблюдается, поскольку спектр, полученный в режиме каналирования (кривая В) лежит ниже спектра, соответствующего направлению без открытых каналов.

На рис. 3 показаны спектры резерфордовского рассеяния, полученные в режиме каналирования для исходной структуры (А), структуры, облученной

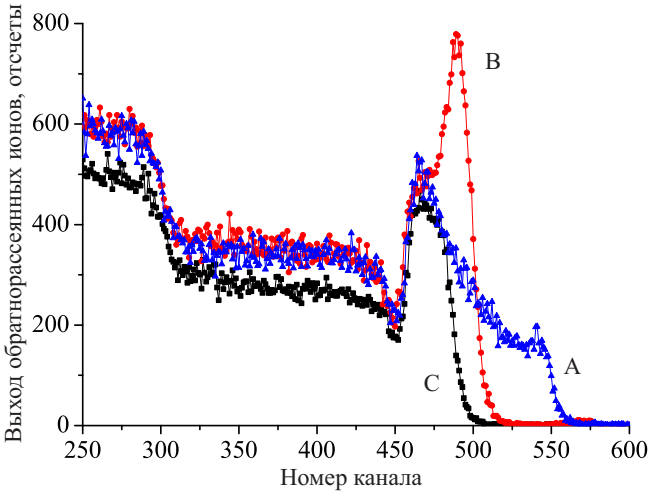

Рис. 3. РОР-спектры образцов в режиме каналирования. А — исходный образец; В — после обработки несепарированным пучком; С — пучок без атомарных ионов

при отсутствии масс-сепарации с дозой, в два раза меньшей, чем в первом случае $2.25 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ (В), и структуры, облученной пучком кластерных ионов, из которого удалялись атомарные и легкие кластерные ионы (С).

Результаты моделирования резерфордовского обратного рассеяния и измерения с помощью профилометра для случая облучения несепарированным пучком дают значение толщины остаточной пленки кремния 163 нм. Эта величина значительно превосходит пробеги ионов аргона с энергией 30 кэВ. Следовательно, каскады столкновений, создаваемые атомарными ионами в пленке кремния, не могут вызвать разупорядочение границы раздела.

Сравнивая толщины слоев вещества, распыленного при облучении, с дозами, отличающимися вдвое, можно обнаружить, что толщины стравленных слоев также отличаются вдвое. Таким образом, коэффициент распыления не зависит от дозы об-

лучения и его значение приблизительно равно 30. Такое значение несколько ниже полученного в работе [9], что объясняется наличием в пучке ионизированных частиц атомарных ионов. Действительно, коэффициент распыления кремния ионами аргона с энергией 30 кэВ равен 1.8 [10], что значительно меньше коэффициента распыления кремния кластерными ионами аргона с размерами около 1000 атомов. Таким образом, атомарные ионы, присутствующие в пучке частиц, уменьшают коэффициент распыления, полученный в расчете на один ион, по сравнению с сепарированным пучком кластерных ионов.

После обработки пучком ионов, содержащим мономеры, легкие и тяжелые кластеры (кривая B), увеличивается выход рассеянных ионов в области канала 500, соответствующего рассеянию от верхних слоев кремния. Из этого можно сделать вывод об ухудшении качества кристаллической структуры этих слоев. На кривой B также присутствует пик от проникших в объем атомов аргона. Тем не менее, в отличие от рис. 2, провал в области канала 450, соответствующий рассеянию от границы раздела кремния и сапфира, не изменился по сравнению со спектром от исходной структуры. Таким образом, перемешивания пограничных слоев действительно не произошло.

В случае обработки пучком без атомарных ионов (кривая C) новых пиков в спектре не наблюдается, т. е. аргон в объеме кремния отсутствует. Кроме того, в области обратнорассеянных ионов от кислорода форма спектра не меняется, а в области, соответствующей рассеянию на кремнии, кривая C лежит ниже кривых A и B. Это говорит о том, что ни разрушения кристаллической структуры кремния, ни тем более границы раздела не происходит. Толщина остаточной пленки кремния в этом случае составляла 100 нм.

Следовательно, дефекты, вносимые в пленку кремния и структуры границы раздела кремний–сапфир под действием пучка кластерных ионов в отсутствие масс-сепарации, образуются в результате проникновения в структуру атомарных ионов аргона, присутствующих в пучке. При удалении из пучка атомарных ионов и легких кластеров, за счет особенностей взаимодействия кластерных ионов с веществом, атомы аргона не проникают в объем мишени. В этом случае осуществляется бездефектное травление структуры.

Заключение

В работе с помощью обратного резерфордовского рассеяния в сочетании с каналированием исследовано образование дефектов в пленках кремния на сапфире под действием облучения пучком кластерных ионов аргона. Показано, что в случае присутствия в пучке атомарных ионов аргона в кристаллическую структуру образца вносятся дефекты за счет проникновения атомов аргона в объем вещества. В случае использования пучка кластерных ионов с удаленными атомарными и легкими кластерными ионами дефекты в объеме мишеней отсутствуют. Таким образом, для осуществления бездефектного воздействия кластерными ионами на поверхность вещества необходимо использование масс-сепаратора в конструкции ускорителя кластерных ионов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.607.21.0072, проект RFMEFI60714X0072).

Список литературы

1. *Yamada I.* // Appl. Surf. Sci. 2014. **310**. P. 77.
2. *Chernysh V.S., Ieshkin A.E., Ermakov Yu.A.* // Appl. Surf. Sci. 2015. **326**. P. 285.
3. *Шемухин А.А., Балакшин Ю.В., Черныш В.С.* и др. // Письма в ЖТФ. 2012. **38**, № 19. С. 83. (*Shemukhin A.A., Balakshin Yu.V., Chernysh V.S.* et al. // Tech. Phys. Lett. 2012. **38**, N 10, P. 907.)
4. *Shemukhin A.A., Nazarov A.V., Balakshin Yu.V., Chernysh V.S.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2015. **354**. P. 274.
5. *Andreev A.A., Chernysh V.S., Ermakov Yu.A., Ieshkin A.E.* // Vacuum. 2013. **91**. P. 47.
6. *Иешкин А.Е., Ермаков Ю.А., Черныш В.С.* // Письма в ЖТФ. 2015. **41**, № 22. С. 8. (*Ieshkin A.E., Ermakov Yu.A., Chernysh V.S.* // Tech. Phys. Lett. 2015. **41**, N 11. P. 1072.)
7. http://www.simnra.com.
8. http://www.srim.org.
9. *Seki T., Murase T., Matsuo J.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2006. **242**. P. 179.
10. *Yamamura Y., Tawara H.* // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1996. **62**. P. 149.

The influence of the gas cluster ion beam composition on defect formation in targets

A. E. Ieshkin[1,a], **A. A. Shemukhin**[2], **Yu. A. Ermakov**[2], **V. S. Chernysh**[1,2]

[1] *Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*
[2] *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*
E-mail: [a] *ieshkin@physics.msu.ru.*

Defect formation in silicon-on-sapphire films under the action of a gas beam of 30 keV argon cluster ions is studied. Rutherford backscattering in the channeling mode is used to demonstrate the formation of a large

number of defects in the volume of a specimen that is irradiated by a cluster ion beam without mass separation. If atomic and light cluster ions are removed from the beam, defect-free etching of the specimen occurs.

Keywords: cluster ions, silicon-on-sapphire, sputtering, amorphization, smoothing, RBS.
PACS: 36.40.–c, 68.49.Sf.
Received 25 November 2015.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2016. **71**, No. 1. Pp. 87–90.

Сведения об авторах

1. Иешкин Алексей Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-29-89, e-mail: ieshkin@physics.msu.ru.
2. Шемухин Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-37-70, e-mail: shemukhin@gmail.com.
3. Ермаков Юрий Анварович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-37-70, e-mail: yuerm@anna19.sinp.msu.ru.
4. Черныш Владимир Савельевич — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-29-89, e-mail: chernysh@physics.msu.ru.