

PACSnumbers: 61.80.Jh, 61.82.Fk, 68.37.Lp, 68.47.Gh, 68.55.Nq, 81.40.Wx, 81.65.Cf

Физические механизмы распыления мишеней из SiO_2 ускоренными ионами фуллерена C_{60}

М. В. Малеев, Е. Н. Зубарев, В. Е. Пуха, А. Н. Дроздов, А. С. Вус

*Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
ул. Фрунзе, 21,
61002 Харьков, Украина*

Исследованы физические закономерности и механизмы роста углеродных плёнок и эрозии поверхности при облучении мишеней из кварца (SiO_2) пучком ускоренных ионов C_{60} с энергией в интервале 2,5–10 кэВ при температуре мишени 373 К. Установлено, что рост углеродных плёнок на поверхности облучаемых мишеней из SiO_2 наблюдается в интервале энергий ионов 2,5–3,75 кэВ. При этом скорость осаждения углерода лимитируется процессом эрозии поверхности роста, интенсивность которого зависит от энергии ионов. При энергии ионов выше верхних значений указанных интервалов плёнка на поверхности не формируется, и наблюдается эрозия материала мишени. Показана возможность удаления аморфного оксида с поверхности кремниевой подложки и формирование на ней эпитаксиального карбида кремния.

Досліджено фізичні закономірності та механізми росту вуглецевих плівок та ерозії поверхні при опроміненні мішеней з кварцу (SiO_2) пучком прискорених йонів C_{60} з енергією в інтервалі 2,5–10 кеВ за температури мішені у 373 К. Встановлено, що ріст вуглецевих плівок на поверхні мішеней з SiO_2 , які опромінюються йонами C_{60} , спостерігається в інтервалі енергій йонів 2,5–3,75 кеВ. При цьому швидкість осадження вуглецю лімітується процесом ерозії поверхні росту, інтенсивність якого залежить від енергії йонів. При енергії йонів вище верхніх значень зазначених інтервалів плівка на поверхні не формується, і спостерігається ерозія матеріалу мішені. Показано можливість видалення аморфного оксиду з поверхні кремнієвого підложжя і формування на ній епітаксійного карбїду кремнію.

Growth of carbon films and surface erosion during irradiation of quartz (SiO_2) by accelerated C_{60} -ion beams with energies in the range of 2.5–10 keV at a target temperature of 373 K are investigated. As found, the growth of carbon films on the surface of the irradiated targets of SiO_2 is observed in the range of ion energies of 2.5–3.75 keV. In this case, carbon deposition rate is

limited by the process of erosion of the growth surface, the intensity of which depends on the energy of the ions. When the ion energy is higher than the upper values of these intervals, the film is not formed on the surface, and erosion of the target material takes place. The possibility of both removing of the amorphous oxide from the surface of Si substrate and forming of an epitaxial silicon carbide thereon is shown.

Ключевые слова: структура плёнок, распыление поверхности, энергия ионов, кварц, фуллерен.

(Получено 24 марта 2015 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионные пучки фуллерена C_{60} нашли применение во вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) [1–4] для распыления анализируемого вещества, послойного анализа методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) [5, 6], показана также возможность формирования из них сверхтвёрдых нанокompозитных покрытий [7–9]. Интервал энергий, где происходит смена роста плёнки на распыление поверхности, индивидуален для материала мишени [10] и, кроме того, может быть связан с химическим составом остаточной атмосферы вакуумной камеры [11]. Таким образом, распыление при помощи ускоренных ионов C_{60} может обладать высокой селективностью, что весьма важно для формирования наноструктурированных поверхностей и применений в микроэлектронике для фотолитографических процессов. Особый интерес в этом случае вызывает система SiO_2/Si , которая является основой элементной базы современной микроэлектроники. Если распыление кремния ионами C_{60} исследовалось как экспериментальными [11, 12], так и теоретическими [10, 13] методами, то зависимость коэффициента распыления SiO_2 от энергии не определена до сих пор. В работе [6] показана возможность распыления SiO_2 ионами C_{60} энергией 5 кэВ со скоростью 2,4 нм/мин. Известно также, что при энергии 2,5 кэВ на поверхности стекла, основным компонентом которого является SiO_2 , формируется углеродная плёнка [14]. Поверхность кремния начинает распыляться при энергии ионов в интервале от 7 до 8 кэВ [11], а при более низких энергиях растёт алмазоподобная плёнка. Селективность распыления, наблюдаемая для системы SiO_2/Si , связана, по-видимому, с химическим взаимодействием углеродных атомов, составляющих каркас молекулы фуллерена, с кислородом и может быть использована для формирования наноструктур на основе оксида кремния и алмазоподобных углеродных плёнок [14] при условии определения закономерностей распыления поверхности SiO_2 .

Таким образом, целью данной работы стало определение физических закономерностей и механизмов распыления и осаждения ве-

щества при бомбардировке поверхности оксида кремния ускоренными ионами C_{60} в диапазоне энергий от 2,5 до 10 кэВ, охватывающем переход от роста плёнок к эрозии мишени. Исследование выполнялось при нормальном падении пучка.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Измерение коэффициента осаждения и распыления

Для экспериментального исследования процессов осаждения и распыления при взаимодействии ускоренных ионов C_{60} с поверхностью использовался модифицированный вакуумный пост ВУП-5М. Рабочее давление в камере во время эксперимента составляло $\cong 10^{-4}$ Па. Ионный пучок генерировался при помощи ионного источника с седловидным электрическим полем [7] при ускоряющем напряжении в диапазоне от 3 до 6 кВ. В качестве рабочей среды для ионного источника использовались пары фуллерена C_{60} . Фуллереновый порошок (C_{60} чистотой 99,5%, NeoTechProduct, Saint Petersburg, Russia) загружался в две эффузионные ячейки, расположенные на противоположных боковых сторонах ионного источника. Для предотвращения конденсации C_{60} на внутренних стенках корпус источника прогревался до температуры 673 К. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

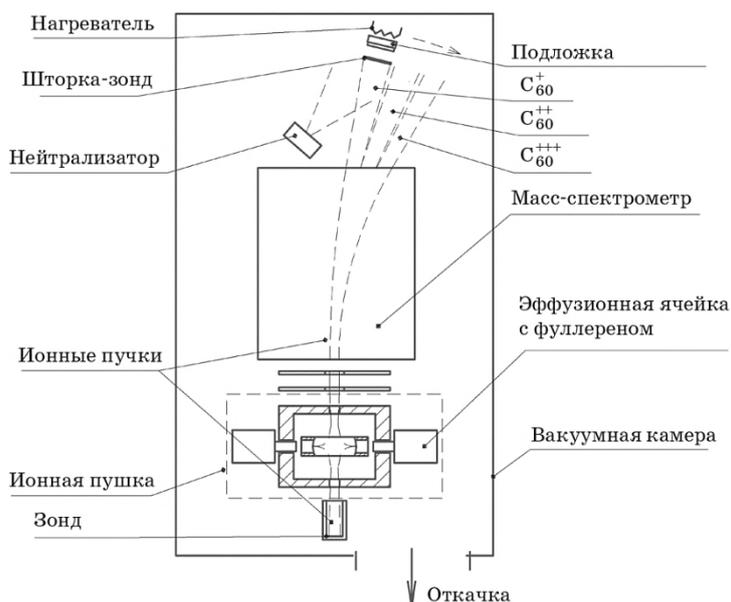


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

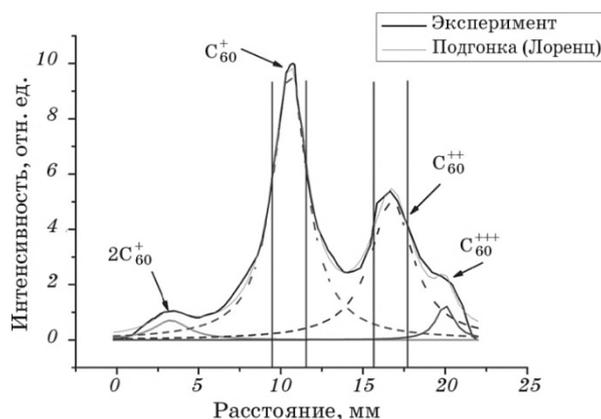


Рис. 2. Пространственное распределение пучка после магнитного сепаратора.

Ионный пучок после выхода из источника фокусировался и ограничивался системой электростатических линз и щелей и направлялся в магнитный сепаратор (индукция магнитного поля 0,6 Тл), где отсекались ионы малых масс и энергий, а также пространственно разделялись ионы C_{60} различного типа (димеры, одно-, двух- и трёхзарядные фуллереновые молекулы). Пространственное распределение пучка после магнитного сепаратора приведено на рис. 2. Для определения соотношения компонентов в пучке мы использовали аппроксимацию пространственного распределения элементарных пучков функциями Гаусса и Лоренца. Суммарная функция на основе функций Лоренца при этом наиболее близка к экспериментальной кривой. Пространственные границы пучков на рис. 2 показаны вблизи максимумов вертикальными линиями.

В таблице 1 приведены соотношения между компонентами пучка. Для распыления мишени использовались одно- и двухзарядные ионы фуллерена. С помощью шторки-зонда, закреплённой на держателе, подложка, служащая мишенью, выводилась на пучок однозарядных либо двухзарядных ионов C_{60} , затем шторка открывалась, и подложка обрабатывалась пучком ионов. Ток ионов C_{60} на

ТАБЛИЦА 1. Состав ионного пучка C_{60} .

Частицы	Процентное содержание, %
$2C_{60}^+$	4,7
C_{60}^+	71,8
C_{60}^{++}	22
C_{60}^{+++}	1,5

мишень измерялся при помощи шторки-зонда до и после распыления мишени. В процессе распыления ток на мишень поддерживался постоянным за счёт поддержки стабильности температуры испарителей фуллерена. Контроль ионного тока осуществлялся при помощи зонда на втором мониторинговом выходе пучка ионного источника. Во время распыления диэлектрических мишеней заряд пучка компенсировался нейтрализатором, в качестве которого использовалась пушка медленных электронов. Энергия электронов, используемых для нейтрализации, не превышала 50 эВ.

В качестве мишеней использовались оптически прозрачные пластины из плавленого кварца и кремниевые пластины КЭФ-1 с ориентацией (100), покрытые естественным слоем окисла и термически окислённые с толщиной окисла 100 нм. Тепловой контакт между подложкодержателем и мишенью осуществлялся через слой жидкого металлического сплава In–Ga эвтектического состава. Температура мишени поддерживалась в нужном диапазоне при помощи вольфрамового нагревателя. Для определения энергетического распределения пучка на место мишени устанавливался многосеточный зонд, и энергетическое распределение ионов рассчитывалось путём дифференцирования кривых задержки [15]. Кривые задержки одно- и двухзарядных ионов, с учётом масштабного коэффициента по току, практически совпадали, то есть средние энергии двухзарядных ионов в два раза превышают средние энергии однозарядных ионов. Энергетические распределения ионов C_{60} при ускоряющих потенциалах 3, 4, 5 и 6 кВ приведены на рис. 3. Там же приведены энергетические распределения для двухзарядных ионов при уско-

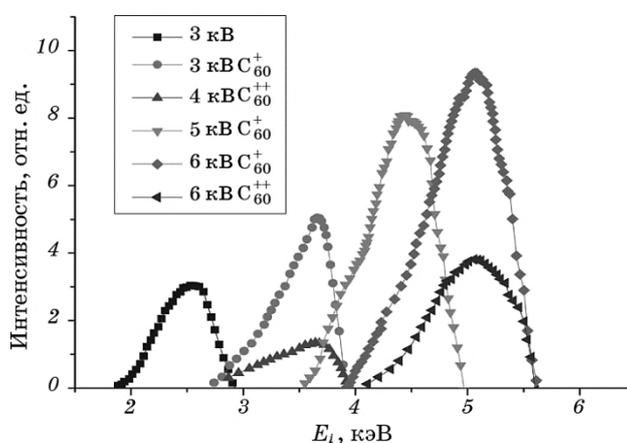


Рис. 3. Энергетические распределения одно- и двухзарядных ионов C_{60} при ускоряющих потенциалах 3, 4, 5 и 6 кВ. Для двухзарядных ионов приведены энергетические распределения для 4 и 6 кВ (значения нижней шкалы в этом случае необходимо удвоить).

ТАБЛИЦА 2. Зависимость средних энергий ионов в пучке от величины ускоряющего потенциала (U_a — ускоряющее напряжение на электродах ионного источника, E_i — средняя энергия ионов).

U_a , кВ	3	4	5	6
E_i , кэВ	2,5	3,6	4,4	5

ряющих потенциалах 4 и 6 кВ. Значения средних энергий ионов в пучках, измеренные при различных ускоряющих потенциалах, приведены в табл. 2. Определение вторичной электронной эмиссии выполнялось по разнице полного тока пучка на коллектор зонда и тока с подачей потенциала на сетку, задерживающую вторичные электроны. Для однозарядных ионов при ускоряющих напряжениях 3 и 6 кВ коэффициент вторичной эмиссии составил 3% и 10% соответственно, для двухзарядных ионов при ускоряющем напряжении 6 кВ коэффициент вторичной эмиссии составил около 20%.

Коэффициенты распыления вещества мишени и поверхности углеродных плёнок (Y) определялись как отношение числа атомов, испускаемых мишенью, к числу бомбардирующих мишень ионов фуллерена. Для этого измерялся ионный ток на мишень с учётом вторичной электронной эмиссии, и определялась глубина травления мишени либо толщина плёнки, нарастающей на её поверхности. На мишень в качестве маски накладывалась никелевая сетка, покрытая проводящим углеродным слоем. Покрытие предотвращало загрязнение никелем поверхности мишени. Размер ячейки сетки — $0,35 \times 0,35$ мм², шаг — 0,4 мм. Ступенька на границе затенения измерялась при помощи двухлучевого интерферометра МИИ-4. Результаты измерений в каждой ячейке сетки усреднялись по всей облучаемой поверхности мишени. Количество бомбардирующих мишень ионов определялось из величины тока одно- либо двухзарядных ионов S_{60} , приходящих на мишень. Расчёт коэффициента распыления облучаемой поверхности выполнялся по формуле

$$Y = \frac{qS}{It} \left(\frac{It60}{qS} \pm \frac{h\rho N_A n}{M} \right), \quad (1)$$

где I — ток на мишень, S — облучаемая площадь, t — время облучения ионами, q — заряд иона, N_A — число Авогадро, n — количество атомов в молекуле.

При травлении мишени суммируется количество атомов вытравленного вещества мишени и количество атомов углерода, приходящих на мишень в виде ионов фуллерена, которые тоже удаляются при распылении (знак плюс в числителе). В этом случае h — глубина травления поверхности, ρ и M — плотность и молекулярная масса вещества мишени. Количество атомов распылённого вещества в

случае конденсации равна разнице количества атомов углерода, приходящих на мишень в виде ионов фуллерена и атомов, остающихся на поверхности мишени в виде плёнки (знак минус в числителе, ρ и μ относятся к веществу плёнки, h — её толщина). В знаменателе в обоих случаях фигурирует количество ионов фуллерена, пришедших на мишень.

Плотность плёнок определялась по углу полного внешнего отражения рентгеновских лучей. Регистрация кривых малоуглового рентгеновского отражения осуществлялась на дифрактометре ДРОН-3М в излучении $\text{CuK}_{\alpha 1}$ ($\lambda = 0,15406$ нм) с использованием кососрезанного кремниевого монохроматора (110). Моделирование кривых малоугловой рентгеновской дифракции выполнялось в программе IMD Д. Виндта [16], позволяющей моделировать кривые зеркального отражения и незеркального рассеяния на основе DWBA теории взаимодействия рентгеновских лучей с твёрдым телом [17]. Кроме плотности определялась и толщина тонких углеродных плёнок путём подгонки формы кривых малоугловой рентгеновской дифракции (θ – 2θ -сканирование) в программе IMD. Плотность плёнок определялась для энергий ионов 2,5, 5, 7,5, 10, 11,5 кэВ (рис. 4). Подложкой в этом случае служила кремниевая шайба, на которую предварительно при энергии ионов 5 кэВ была нанесена углеродная плёнка толщиной 2 нм. Углеродная плёнка защищала поверхность кремния от распыления [18]. Данные по плотности углеродных плёнок для промежуточных значений и более высоких энергий определялись путём линейной интерполяции и экстраполяции графика зависимости плотности плёнок от энергии. Когда рост углеродной плёнки отсутствовал, т.е. происходило травление мишени, для расчётов использовалась плотность плавленого кварца

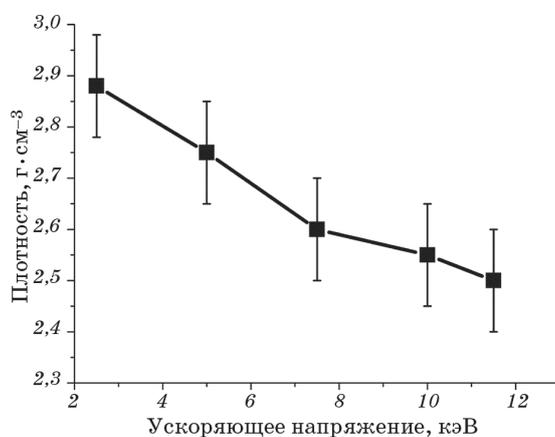


Рис. 4. График изменения плотности плёнок в зависимости от энергии ионов для образцов, полученных при температуре 373 К.

либо плотность кремния.

2.2. Исследование структуры

Исследование структуры плёнок выполнялось при помощи просвечивающего электронного микроскопа JEM-3000F (JEOL, Япония) с типичным разрешением по точкам 0,16 нм. Препарирование образцов для ПЭМ выполнялось по стандартной методике приготовления поперечных сечений для электронной микроскопии. Образец на кремнии в виде двух пластинок склеивался сторонами с нанесённой плёнкой при помощи проводящей эпоксидной смолы, затем механически шлифовался. Дальнейшее утонение выполнялось при помощи ионных пушек, пучки из которых под малым углом ($\cong 13^\circ$) стравливали склеенные образцы с двух боковых сторон. Ускоряющее напряжение на электродах ионных пушек при утонении составляло 6 кВ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Распыление поверхности кварца ускоренными ионами C_{60}

Результаты исследования поверхности мишени из плавленого кварца при помощи двулучевого интерферометра приведены на рис. 5. Как выяснилось, при анализе рельефа, полученного в результате затенения поверхности маской в виде сетки, облучение поверхности плавленого кварца, в зависимости от энергии ускоренных ионов C_{60} , приводит к росту на поверхности мишени углерод-

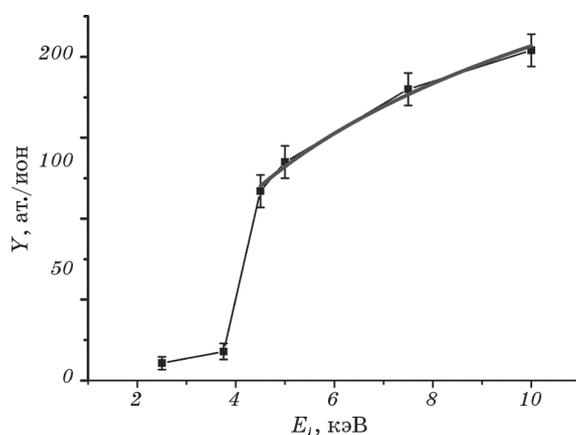


Рис. 5. Интегральный коэффициент распыления мишени из плавленого кварца.

ных плёнок либо к травлению поверхности. Чтобы охарактеризовать поверхностные процессы во всем интервале энергий, используем интегральный коэффициент распыления Y , который показывает количество выбитых атомов мишени одним ионом фуллерена независимо от их природы.

При бомбардировке поверхности SiO_2 ионами C_{60} с энергией в интервале 2,5–3,75 кэВ наблюдался рост углеродной плёнки. С другой стороны, толщина h углеродной плёнки, измеренная при помощи интерферометра, меньше чем толщина h_i , рассчитанная из количества вещества, приносимого ионами C_{60} на поверхность:

$$h_i = ItM60 / (S\rho qN_A), \quad (2)$$

где M — молекулярная масса углерода, ρ — измеренная плотность углеродной плёнки. Обозначения остальных величин — такие же, как в (1). Очевидно, что при разрушении молекулы в момент удара, часть атомов углерода покидает поверхность мишени. Таким образом, количество осаждённого вещества на мишень в значительной мере может лимитироваться распылением. Под распылением мы подразумеваем ряд процессов, включающих физическое распыление, термическое испарение атомов из «теплового пика», образующегося в месте удара молекулы с высокой энергией и химическое распыление при образовании летучих соединений вещества мишени с углеродом [19]. Измерение толщины углеродной плёнки и подстановка в формулу (1) экспериментальных значений с учётом вторичных эффектов, показало, что даже при энергии ионов C_{60} 2,5 кэВ, каждый удар иона приводит к распылению в среднем 10,7 атомов углерода (коэффициент распыления углерода $Y_C = 10,7$). Если рассматривать этот процесс в терминах осаждения углеродной плёнки, когда из 60 атомов иона фуллерена осаждается на поверхности в среднем $60 - 10,7 = 49,3$ атома, то можно заключить, что коэффициент осаждения не превышает 0,82. С увеличением энергии ионов C_{60} коэффициент осаждения углерода уменьшается и при энергии 3,75 кэВ составляет 42 атома на ион фуллерена, т.е. 0,7.

При энергии бомбардирующих ионов выше 3,75 кэВ рост плёнки прекращается и начинается ионное травление поверхности SiO_2 . Коэффициент распыления в интервале средних энергий ионов 3,75–4,4 кэВ возрастает с 18 до 60 (в 3,3 раза). Существенное увеличение коэффициента распыления («скачок» коэффициента распыления) можно связать с образованием летучих продуктов в результате реакций углерода с кислородом мишени (CO , CO_2). С другой стороны, в работе [18] показано существование подобных «скачков» коэффициента распыления при бомбардировке ионами C_{60} элементарных мишеней из углерода и кремния. В этом случае химическое распыление отсутствует.

Shixin Sun и др. [20] для объяснения появления кластеров с высокими энергиями при распылении Ag ионами C_{60} предложили взрывной механизм распыления с образованием высокоскоростных струй кластеров распылённого вещества. Экспериментальные результаты, полученные, а работе [20], подтверждены молекулярно-динамическим моделированием, проведённым Z. Postawa и др. в [21]. Переход от механизма, связанного с термическим испарением из теплового пика [19, 22] к взрывному, может обуславливать скачок коэффициента распыления. Очевидно, подобный механизм должен реализоваться при превышении некой пороговой энергии бомбардирующих ионов, величина которой зависит от теплофизических характеристик вещества.

Дальнейший рост энергии ионов (более 4,4 кэВ) приводит к плавному росту интегрального коэффициента распыления. При энергии 10 кэВ коэффициент распыления достигает 204, т.е. один ион C_{60} выбивает с поверхности, кроме 60 атомов углерода, в среднем 48 атомов кремния и 96 атомов кислорода. Закон возрастания интегрального коэффициента распыления близок к логарифмическому:

$$Y = 93,6 \ln(E_i - 0,89). \quad (3)$$

Следует заметить, что для элементарных мишеней (Si, C) интегральный коэффициент распыления при энергиях выше «скачка» пропорционален энергии ионов с коэффициентом пропорциональности, характерным для данного вещества [18]. Нелинейность зависимости коэффициента распыления для кварца указывает на дополнительные механизмы распыления, которые отсутствуют у элементарных мишеней. Если сравнить положение «скачка» коэффициента распыления при повышении энергии ионов для Si и SiO_2 , температуры испарения которых не сильно отличаются (1350°C и 1250°C для равновесного давления 10^{-2} Торр [23]), то по энергетической шкале положение «скачка» коэффициента распыления отличается в 2 раза (7,5 кэВ и 3,75 кэВ соответственно). Мы предполагаем, что дополнительный механизм распыления связан с образованием летучих продуктов реакции углерода с кислородом мишени (CO, CO_2). Этот механизм не является основным, но вносит существенный вклад как в нелинейность зависимости коэффициента распыления от энергии, так и в сдвиг его «скачка» в область более низких энергий ионов.

3.2. Формирование углеродной плёнки на поверхности окислённого кремния

Исследование распыления поверхности окислённого кремния показало, что закономерности распыления плёнки SiO_2 , выращенной

сухим окислением на кремнии, имеют такой же вид, как и для плавленого кварца. До энергии ионов C_{60} 3,75 кэВ на поверхности растёт углеродная плёнка, а дальнейшее повышение энергии ионов приводит к росту интегрального коэффициента распыления и при энергиях близких к 4,4 кэВ — к распылению окисла. После того, как граница распыления достигает поверхности кремния, в зависимости от энергии ионов, наблюдается либо распыление Si, либо рост углеродной плёнки. Интервал энергий ионов, в пределах которого происходит распыление SiO_2 и рост углеродной плёнки на кремнии, составляет $\approx 3,1$ кэВ (от 4,4 до 7,5 кэВ). Этот интервал интересен для использования в технологии приборных структур (для формирования «окон» в диэлектрическом оксиде и росте на поверхности кремния углеродных структур).

Для изучения возможности формирования таких «окон» часть окислённой шайбы Si была закрыта углеродной плёнкой толщиной 5 нм, полученной при энергии ионов 2,5 кэВ, затем эта пластина была подвергнута воздействию ионного пучка фуллерена с энергией 5 кэВ. Углеродная плёнка, по данным работы [18], не распыляется вплоть до энергии ионов C_{60} 19 кэВ и, таким образом, может быть использована в качестве маски. В области с углеродным покрытием на поверхности, толщина покрытия увеличилась. В области без покрытия оксид был вытравлен до кремния, на поверхности которого выросла углеродная плёнка. Эта область легко определялась по уменьшенному электрическому сопротивлению.

Для исследования границы углерод-кремний, возникшей после распыления окисла на поверхности Si, использована высокоразрешающая просвечивающая электронная микроскопия (ВР ПЭМ) поперечного сечения образца (рис. 6 и 7). Электронный пучок парал-

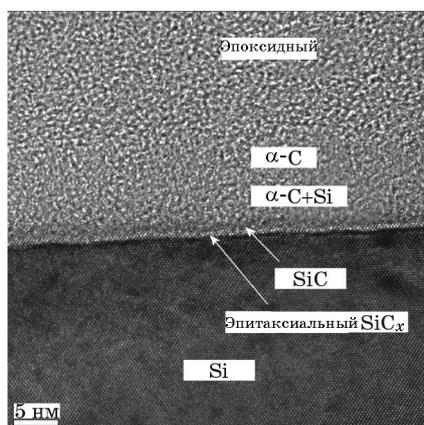


Рис. 6. ВР ПЭМ поперечного сечения окислённого кремния после распыления окисла.

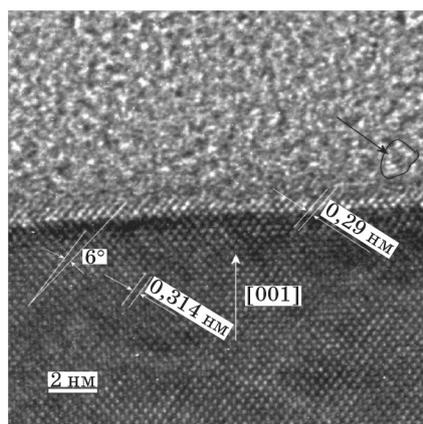


Рис. 7. ВР ПЭМ перехода между Si(100) и углеродной плёнкой.

лелен направлению $[110]\text{Si}$ и на нижней части изображений наблюдается контраст от рядов атомных плоскостей $(111)\text{Si}$ с межплоскостным расстоянием 0,314 нм. На рисунке 6 ясно различимы, кроме монокристаллического кремния и слоя эпоксидной смолы, находящиеся между ними четыре зоны, которые последовательно формировались при бомбардировке кремния ускоренными ионами C_{60} . Отличия структуры этих зон связано как с влиянием кристаллической структуры подложки, так и градиентом концентрации кремния в перемешанном слое, который возникает в результате бомбардировки поверхности Si ионами C_{60} [24]. На рисунке 6 представлено ВР ПЭМ-изображение перехода между Si(100) и углеродной плёнкой при большом увеличении.

Анализ ПЭМ изображений позволил установить, что на поверхности кремния формируется эпитаксиальный слой, состоящий из 4–6 атомных плоскостей с межплоскостными расстояниями 0,29 нм. Угол между этими плоскостями и плоскостями $(111)\text{Si}$ составляет 6° . Уменьшенные межплоскостные расстояния ($\cong 8\%$) относительно межплоскостных (111) кремния для эпитаксиального слоя позволяют предположить, что он имеет состав SiC_x с избытком кремния над стехиометрическим составом. Рост эпитаксиальных слоёв SiC_x при низких температурах подложки стимулируется возникновением теплового «пика» с температурой в несколько тысяч градусов, возникающем в месте удара ускоренного иона C_{60} [25]. Формирование эпитаксиального слоя карбида кремния на Si(111) поверхности при комнатной температуре наблюдалось Roberto Verucchi [26] при бомбардировке Si ионами C_{60} с энергией 30–35 эВ, т.е. при энергиях на два порядка ниже, чем у нас.

При дальнейшем росте плёнки концентрация Si падает, происходит срыв эпитаксии и формируется переходной слой, состоящий из

изогнутых неупорядоченных коротких (4–6 атомных колонок) плоскостей. Толщина переходного слоя составляет $\cong 1$ нм. За ним следует слой, состоящий из аморфного вещества, в котором ещё может присутствовать кремний с малой концентрацией. Некоторые объекты размером $\cong 1$ нм (на рис. 7 обведены черным контуром и показаны стрелкой) могут быть нанокристаллами SiC (расстояние между линиями полосчатого контраста $\cong 0,25$ нм). Ширина этого слоя не превышает 3–4 нм. Далее этот слой плавно переходит в аморфную плёнку со структурой, типичной для алмазоподобного углерода [27].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены процессы эрозии поверхности при облучении пучком ускоренных ионов C₆₀ мишеней из плавленого кварца в диапазоне энергий 2,5–10 кэВ. Определён интегральный коэффициент распыления Y и показано, что до энергии 3,75 кэВ в стационарном режиме облучения растёт углеродная плёнка. Количество осаждённого вещества на мишень контролируется дозой облучения и коэффициентом распыления, который увеличивается от 10,7 ат./ион до 18 ат./ион при увеличении энергии от 2,5 до 3,75 кэВ. В терминах роста углеродной плёнки коэффициент осаждения снижается при этом с 0,82 до 0,7.

При энергии ионов 4,4 кэВ рост углеродной плёнки отсутствует и обнаружено травление поверхности мишени. Коэффициент Y составил 117 ат./ион, т.е. кроме 60 атомов углерода распыляется ещё 57 атомов вещества мишени. Дальнейший рост энергии ионов (свыше 4,4 кэВ) приводит к плавному росту Y по закону близкому к логарифмическому. При энергии 10 кэВ интегральный коэффициент распыления достигает 204 ат./ион.

Наблюдаемый скачок Y (в 6,5 раз) в интервале энергий 3,75–4,4 кэВ связан со сменой основного механизма распыления и, может быть, обусловлен переходом от термического испарения из теплового пика к взрывному испарению.

Показана возможность применения пучков ускоренных ионов C₆₀ в фотолитографии для формирования «окон» в диэлектрическом оксиде кремния и выращивания в «окне» на поверхности кремния углеродных структур.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА—REFERENCES

1. N. Winograd, *Surf. Interface Anal.*, **45**, No. 1: 3 (2013).
2. N. Winograd, *Anal. Chem.*, **77**, No. 7: 142 (2005).
3. E. J. Lanni, S. J. Dunham, P. Nemes, S. S. Rubakhin, and J. V. Sweedler, *J. Am. Soc. Mass Spectrom.*, **25**, No. 11: 1897 (2014).

4. D. Kobayashi, Y. Yamamoto, and T. Isemura, *Surf. Interface Anal.*, **45**, No. 1: 113 (2013).
5. Y. Y. Chen, B. Y. Yu, W. B. Wang, M. F. Hsu, W. C. Lin, Y. C. Lin, J. H. Jou, and J. J. Shyue, *Anal. Chem.*, **80**, No. 2: 501 (2008).
6. N. Sanada, A. Yamamoto, R. Oiwa, and Y. Ohashi, *Surf. Interface Anal.*, **36**, No. 3: 280 (2004).
7. V. E. Pukha, E. N. Zubarev, A. N. Drozdov, A. T. Pugachov, S. H. Jeong, and S. C. Nam, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **45**, No. 33: 335302 (2012).
8. V. E. Pukha, A. T. Pugachov, N. P. Churakova, E. N. Zubarev, V. E. Vinogradov, and S. C. Nam, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **12**, No. 6: 4762 (2012).
9. O. V. Penkov, V. E. Pukha, E. N. Zubarev, S. S. Yoo, and D. E. Kim, *Tribology International*, **60**: 127 (2013).
10. K. D. Krantzman and B. J. Garrison, *J. Phys. Chem. C*, **113**, No. 8: 3239 (2009).
11. G. Gillen, J. Batteas, C. A. Michaels, P. Chi, J. Small, E. Windsor, A. Fahey, J. Verkouteren, and K. J. Kim, *Appl. Surf. Sci.*, **252**, No. 19: 6521 (2006).
12. J. Kozole and N. Winograd, *Appl. Surf. Sci.*, **255**, No. 8: 886 (2008).
13. K. D. Krantzman, D. B. Kingsbury, and B. J. Garrison, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **255**, No. 1: 238 (2007).
14. M. Khadem, O. V. Penkov, V. E. Pukha, M. V. Maleyev, and D. E. Kim, *Carbon*, **80**: 534 (2014).
15. N. I. Ionov, *Zh. Tekh. Fiz.*, **34**: 769 (1964); idem, *Soviet Physics—Technical Physics*, **9**: 591 (1964).
16. D. L. Windt, *Comp. Phys.*, **12**, No. 4: 360 (1998).
17. D. G. Stearns, D. P. Gaines, D.-W. Sweeney, and E. M. Gullikson, *J. Appl. Phys.*, **84**, No. 2: 1003 (1998).
18. M. V. Maleyev, E. N. Zubarev, V. E. Pukha, A. N. Drozdov, A. S. Vus, and A. Yu. Devizenko, *Fizicheskaya Inzheneriya Poverkhnosti*, **13**, No. 1: 91 (2015) (in Russian).
19. *Raspilyeniye Tvyordyykh Tel Ionnoy Bombardirovkooy. Fizicheskoe Raspilyeniye Odnoelementnykh Tvyordyykh Tel* (Ed. R. Berish) (Moscow: Mir: 1984), Iss. 1 (Russian translation).
20. S. Sun, C. Szakal, N. Winograd, and A. Wucher, *J. Am. Soc. Mass Spectrom.*, **16**, No. 10: 1677 (2005).
21. Z. Postawa, B. Czerwinski, M. Szewczyk, E. J. Smiley, N. Winograd, and B. J. Garrison, *J. Phys. Chem. B*, **108**, No. 23: 7831 (2004).
22. P. Sigmund, *Thin Solid Films*, **520**, No. 19: 6031 (2012).
23. *Tekhnologiya Tonkikh Plyonok: Spravochnik [Handbook of Thin Film Technology]* (Eds. L. I. Maissel and R. Glang) (Moscow: Sovetskoe Radio: 1977), vol. 1 (Russian translation).
24. K. D. Krantzman, C. A. Briner, and B. J. Garrison, *J. Phys. Chem. A*, **118**, No. 31: 8081 (2014).
25. V. E. Pukha, A. N. Stetsenko, S. N. Dub, and J. K. Lee, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **7**, Nos. 4–5: 1370 (2007).
26. R. Verucchi, L. Aversa, M. V. Nardi, S. Taioli, S. Beccara, D. Alfè, L. Nasi, F. Rossi, G., Salviati, and S. Iannotta, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, No. 42: 17400 (2012).
27. M. Zhong, C. Zhang, and J. Luo, *Appl. Surf. Sci.*, **254**, No. 21: 6742 (2008).