

УДК 537.534

УГЛОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ РАСПЫЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ФОКУСИРОВАННЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ ГАЛЛИЯ

© 2020 г. В. И. Бачурин^а, *, И. В. Журавлев^а, Д. Э. Пухов^а, А. С. Рудый^а,
С. Г. Симакин^а, М. А. Смирнова^а, А. Б. Чурилов^а

^аЯрославский филиал Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН,
Ярославль, 150007 Россия

*e-mail: vibachurin@mail.ru

Поступила в редакцию 11.01.2020 г.

После доработки 14.02.2020 г.

Принята к публикации 17.02.2020 г.

Получены угловые зависимости состава поверхностного слоя и коэффициента распыления кремния при облучении поверхности фокусированным пучком ионов галлия с энергией 30 кэВ. Анализ состава поверхности проводился методами растровой электронной оже-спектроскопии и вторично-ионной масс-спектрометрии. Коэффициенты распыления определялись по измерениям объемов распыленных кратеров и дозы облучения. Установлено, что содержание галлия в приповерхностном слое при углах падения, близких к нормали составляет около 30 ат. %. При углах падения, больших 30°, концентрация галлия достаточно резко уменьшается. Угловая зависимость коэффициента распыления кремния не коррелирует с содержанием галлия в приповерхностном слое и достаточно хорошо описывается каскадным механизмом распыления П. Зигмунда.

Ключевые слова: распыление, поверхностные слои образцов, фокусированный ионный пучок, ВИМС, РЭОС.

DOI: 10.31857/S102809602008004X

ВВЕДЕНИЕ

Распыление поверхности фокусированными ионными пучками (ФИП), ранее использовавшееся при подготовке образцов для просвечивающей электронной микроскопии и анализа отказов интегральных микросхем, в настоящее время ФИП широко применяется для формирования наноструктур на поверхности полупроводников [1, 2]. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой исследуется достаточно давно, получен большой объем экспериментальных и теоретических результатов [3, 4]. Однако выяснилось, что бомбардировка образцов фокусированными пучками (диаметр от 10 нм) с высокими дозами облучения существенно влияет на развитие рельефа поверхности образцов, а также на образование слоя осажденного распыляемого материала на дне и стенках кратера травления, содержащего как материал образца, так и имплантированные ионы первичного пучка [5, 6]. В случае распыления кремния пучком ионов галлия осажденный слой содержит Si и Ga. Коэффициент распыления этого слоя может существенно отличаться от коэффициента распыления кремния, так как энергия связи галлия атомов на поверхности почти в два раза меньше, чем у кремния. Поэтому

распыление осажденного слоя будет во многом определяться как концентрацией Ga, так и его химическим состоянием (существованием в виде отдельных преципитатов или образованием химических соединений с Si).

Как правило, формирование наноструктур с высоким отношением глубины к линейным плоскостным размерам с помощью ФИП сопровождается предварительным моделированием процесса [7–9], которое требует точных данных значений коэффициентов распыления и состава приповерхностного слоя при различных углах падения первичного ионного пучка. На сегодняшний день имеется всего лишь несколько экспериментальных работ, посвященных изучению угловой зависимости коэффициента распыления полупроводниковых материалов ФИП галлия [10–12]. Результаты по распылению Si фокусированным ионным пучком Ga наиболее полно представлены в [11], однако в работе не сообщаются детали проведения экспериментов (плотность тока, дозы облучения, методика измерения коэффициентов распыления). В то же время необходимость учета экспериментальных условий на распыление ФИП показана в работе [13].

В работах [11, 14–16] представлены экспериментальные результаты по распределению галлия в приповерхностном слое кремния в случае облучения ФИП галлия при нормальном падении пучка при различных дозах (10^{13} – 10^{18} ион/см²). Экспериментальных данных по составу поверхности при различных углах падения ионного пучка практически нет. Тем не менее, состав приповерхностного слоя может существенно влиять на поведение угловой зависимости коэффициента распыления из-за возможного изменения энергии связи атомов на поверхности. Кроме того, в последнее время появились работы [17, 18], посвященные изучению формирования волнообразного рельефа на поверхности кремния при его облучении ФИП галлия. Как отмечается в [18], понимание механизмов образования таких структур требует информации о составе приповерхностного слоя при различных углах падения пучка, которой к настоящему времени нет.

В данной работе представлены экспериментальные результаты по изучению состава поверхности и измерения коэффициентов распыления кремния фокусированным пучком ионов галлия при различных углах падения ионов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерение угловой зависимости состава поверхности

Образцы для исследования состава приповерхностного слоя Si, облученного фокусированным пучком Ga⁺ с энергией 30 кэВ, методами растровой электронной оже-спектроскопии (РЭОС) и вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) были приготовлены в виде кратеров распыления размером 200 × 200 мкм на установке Quanta 3D 200i. Диаметр пучка ионов Ga⁺ составлял 60 нм, ток – 30 нА, угол падения изменялся от 0° до 80°, доза облучения составляла 2×10^{17} ион/см². Кроме того, были приготовлены образцы, облученные с дозами от 10^{15} до 5×10^{18} ион/см² при нормальном падении ионного пучка Ga⁺ для исследования дозовой зависимости состава поверхности методом ВИМС.

Анализ элементного состава методом РЭОС проводился на установке РН1 660. Оже-спектры регистрировались с центральной части (50 × 50 мкм) подготовленных растров электронным зондом с энергией 10 кэВ, при значении тока 50 нА. Перед измерениями поверхность очищали от адсорбированных примесей бомбардировкой пучком ионов N₂⁺ с энергией 3 кэВ под углом 35° относительно нормали. Время облучения определялось выходом тока оже-электронов Ga на стационарный уровень. Концентрации Ga и Si на поверхно-

сти рассчитывались с использованием высокоэнергетичных пиков элементов Si (1610 эВ) и Ga (1070 эВ) с учетом коэффициентов относительной чувствительности: 0.14 для Ga (1070 эВ) и 0.042 – Si (1610 эВ).

Послойный анализ (ПА) методом ВИМС проводился на установке TOF.SIMS⁵. В качестве анализирующих использовали ионы Вi₃⁺, с энергией 25 кэВ, ток пучка составлял 1.0 пА. Распыление поверхности образца при ПА производилось ионами Cs⁺ с энергией 1 кэВ и током 75 нА. Распыляющий пучок разворачивался в растр на поверхности образца размером 250 × 250 мкм. Сканирование зондирующего пучка осуществлялось в центральной области кратера ионного травления, производимого ионами Cs⁺. Размер области сбора вторичных ионов составлял 50 × 50 мкм.

При регистрации вторичных положительных ионов реализована идеология катионного ВИМС анализа [20] достаточно подробно описанная в работе [21]. Регистрировались ионы, отвечающие масс-пикам: ¹³³Cs₂⁺, ¹³³Cs²⁸Si⁺, ¹³³Cs⁶⁹Ga⁺. Концентрации Ga и Si в ат./см³ получены после нормировки интенсивностей вторичных ионов ¹³³Cs⁶⁹Ga⁺ и ¹³³Cs²⁸Si⁺ на интенсивность опорного сигнала ионов ¹³³Cs₂⁺ в каждой точке профиля умножением на коэффициент относительной чувствительности (КОЧ). Для CsGa, и Cs₂ КОЧ приготовлен в качестве эталонного образец с дозой облучения Si ионами Ga⁺ 10¹⁵ ат./см². КОЧ (CsSi, Cs₂) определяли на этом же образце по известной плотности атомов кремния 5×10^{22} ат./см³, соответствующей стационарному участку профиля.

После окончания ВИМС-анализа глубина кратеров распыления измерялась на профилометре Talystep. В предположении небольших изменений плотности образца в полученных зависимостях концентрации Ga в Si шкала абсцисс – время распыления (с) переводилась в глубину (нм) кратера распыления.

Измерение угловой зависимости коэффициента распыления

Эксперименты по измерению коэффициентов распыления Si ионами Ga⁺ с энергией 30 кэВ проводились на установке Quanta 3D 200i. Диаметр пучка составлял 60 нм, ток – 3 нА, угол падения изменялся от 0° до 80°. На поверхности формировались растры размером 30 × 13 мкм. Размеры кратеров распыления определяли с помощью электронного микроскопа, затем вычисляли их объемы и массы распыленного кремния. На рис. 1 представлены типичные электронно-микроскопические изображения растров распыления. Все

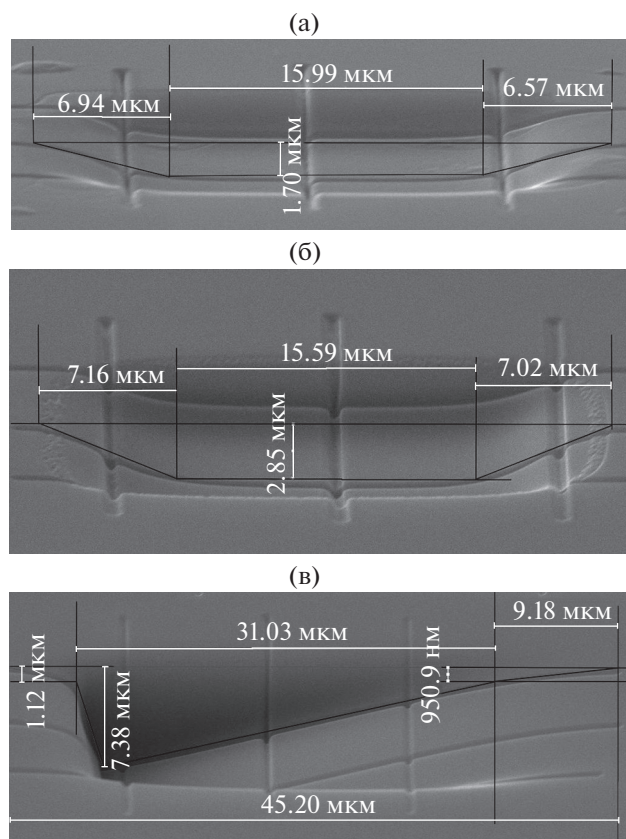


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение растров распыления, полученных при различных углах падения ионного пучка: а – 0° , б – 30° , в – 70° .

эксперименты по облучению образцов Si выполнены при $T = 300$ К.

Поскольку на значения коэффициентов распыления могут влиять условия бомбардировки и доза облучения, были выполнены эксперименты по измерению коэффициентов распыления при различных дозах и различных условиях распыления.

Угловая зависимость коэффициента распыления Si ионами Ga^+ с энергией 30 кэВ (помимо экспериментального измерения) была рассчитана с помощью программы TRIDYN [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав приповерхностного слоя

На рис. 2 представлена угловая зависимость концентрации Ga на поверхности Si, полученная методом РЭОС. Установлено, что атомная концентрация C_{Ga} на поверхности составляет около 60% при нормальном падении пучка. В работе [16] аналогичные измерения проводились с помощью вторично-ионной масс-спектрометрии. Было показано, что C_{Ga} на поверхности составляет около

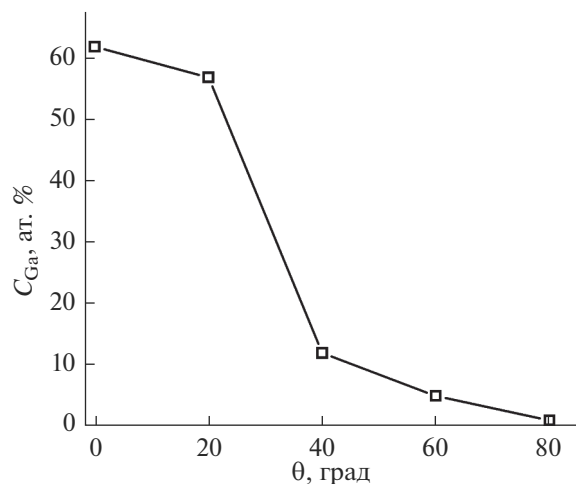


Рис. 2. Угловая зависимость концентрации Ga на поверхности Si, полученная методом РЭОС.

50%, но затем спадает до 20–30% на глубинах ~ 5 нм. Следует отметить, что выход оже-электронов происходит с глубин 0.5–2.5 нм, то есть из нескольких поверхностных слоев. Таким образом, полученные с помощью метода РЭОС значения концентрации Ga на поверхности находятся в согласии с данными работы [16].

При увеличении угла падения до 20° концентрация Ga незначительно уменьшается, а затем наблюдается резкое падение до нескольких процентов при значениях 60° – 80° . Такое поведение, по-видимому, обусловлено увеличением отражения падающих ионов Ga^+ с ростом угла бомбардировки и, следовательно, уменьшением числа внедренных в приповерхностный слой ионов Ga^+ .

Распределение Ga в приповерхностном слое Si было получено при послойном анализе методом ВИМС. На рис. 3 представлены профили плотности имплантированных ионов Ga в случае нормального падения пучка Ga^+ при различных дозах облучения. Кривые 1 и 2 соответствуют дозам облучения 10^{15} и 10^{16} ион/см² соответственно. Максимум распределения внедренных ионов лежит на глубине проективного пробега R_p ионов в Si, который, согласно расчетам, выполненным с помощью программы TRIM, составляет 26 нм.

На начальном участке профиля 3 (доза облучения 10^{17} ион/см²) наблюдаются два локальных максимума для Ga и (соответственно) два локальных минимума для Si, после чего кривая плотности Ga выходит на ожидаемое плато и затем смещается к нулю (рис. 3). Наличие двух максимумов распределения концентрации Ga в Si наблюдалось в работе [5] в которой измерения проводились методом энергодисперсионного анализа поперечного среза образца Si, имплантированного ионами Ga, не связанного с ионной бомбарди-

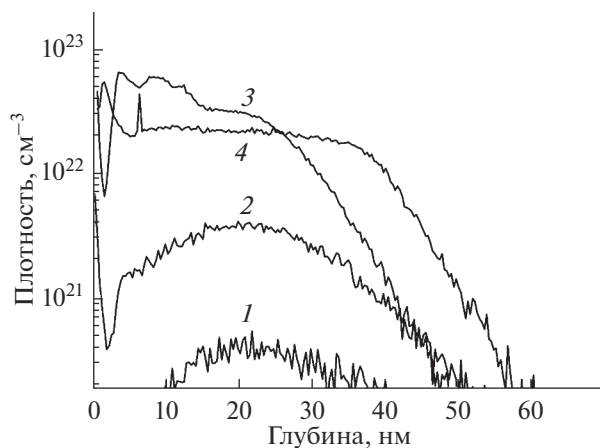


Рис. 3. Послойные профили плотности галлия, полученные методом ВИМС. Дозы облучения Si пучком ионов Ga^+ с энергией 30 кэВ: 1 – 10^{152} , 2 – 10^{16} , 3 – 10^{17} , 4 – 5×10^{17} ион/см².

ровкой поверхности. Поэтому можно исключить предположение о том, что наличие особенностей на полученном методом ВИМС профиле концентрации Ga связано с ионно-индуцированными процессами при ВИМС-анализе. Причиной наличия максимумов на начальном участке профиля 3, по-видимому, является характер распределения, имплантированного Ga в приповерхностном слое Si. В работах [11, 15] дефектность измененного ионной бомбардировкой приповерхностного слоя исследовалось методом просвечивающей электронной микроскопии. Установлено, что при дозах облучения, больших 10^{17} ион/см², имплантированный Ga образует вблизи поверхности преципитаты размером 5–10 нм, расположенные в 2 или 3 ряда по глубине. Поэтому послойные профили Ga образцов, облученных с дозой 10^{17} ион/см² (когда процесс распыления практически только начинается [11]), могут содержать наблюдаемые максимумы концентраций при прохождении во время анализа слоев, содержащих преципитаты Ga.

Начиная с дозы 2×10^{17} ион/см², характер профилей практически не изменяется и имеет вид 4 (рис. 3). Вблизи поверхности содержание Ga сравнимо с концентрацией Si, после чего кривая выходит на плато, и, начиная с глубины 40 нм, резко снижается.

Следует отметить, что в ряде случаев при дозах облучения, больших 5×10^{17} ион/см² (нормальное падение), наблюдается достаточно длинный хвост послойного профиля Ga. На рис. 4 представлен результат послойного анализа образца, облученного с дозой 10^{18} ион/см². Кривые 1 и 2 соответствуют профилям распределения Si и Ga в приповерхностном слое. Видно, что при умень-

шении плотности Ga на полтора порядка (глубина ~ 60 нм) резкий спад изменяется на плавное уменьшение до глубины ~ 150 нм, которая определяется чувствительностью используемого прибора ВИМС. Аналогичные зависимости были получены в работах [11, 15]. Одной из причин широких наблюдаемых хвостов распределения может быть каналирование ионов Ga^+ при облучении вплоть до доз 10^{14} ион/см², при которых начинается аморфизация приповерхностного слоя. Это предположение подтверждается тем, что такие хвосты распределения имплантированных ионов не наблюдались при отличных от нормали углах падения ионного пучка. Другой причиной могут являться ионно-индуцированная диффузия и вбивание внедренного Ga в виде отдельных преципитатов при распылении поверхности во время анализа пучком ионов Cs^+ . На вставке рис. 4 представлено интегральное по глубине ионно-микроскопическое изображение во вторичных ионах Ga^+ -кратера распыления в области проведения анализа. Более яркие пятна на изображении соответствуют более высокому содержанию Ga в анализируемом объеме. Это может свидетельствовать о неравномерном распределении имплантированного Ga в приповерхностном слое. После исключения этих областей при вычислении концентрации был получен исправленный профиль распределения Ga (кривая 3), который соответствует профилям, полученным моделированием процесса имплантации с помощью программы T-DYN [14, 16].

На рис. 5 представлены профили распределения Ga вблизи поверхности Si, облученного при различных углах падения ионного пучка Ga^+ . Видно, что с ростом угла наблюдаются уменьшение содержания Ga в поверхностном слое и размер области в направлении нормали к поверхности, в которой находится имплантированный Ga.

Из полученных профилей послойного анализа следует, что концентрация Ga на поверхности при углах падения пучка ионов Ga^+ $\theta = 0^\circ - 30^\circ$ превышает 50%, что согласуется с вышеприведенными данными работы [16]. Начальные участки профилей имеют максимумы на глубинах $d \sim 2$ нм от поверхности. Далее кривые выходят на плато вплоть до $d \sim 30$ нм. Затем наблюдается достаточно резкий спад концентрации Ga. При $\theta > 30^\circ$ профили практически не содержат горизонтальных участков. Расчет относительных значений концентраций C_{Ga} на поверхности ($d \sim 2$ нм) при различных углах падения по данным ВИМС-анализа дает значения, близкие к результатам, полученным с помощью РЭОС.

Концентрация имплантированного Ga в приповерхностном слое Si определялась по полученным профилям следующим образом. Производилось интегрирование плотностей Ga и Si (рис. 5)

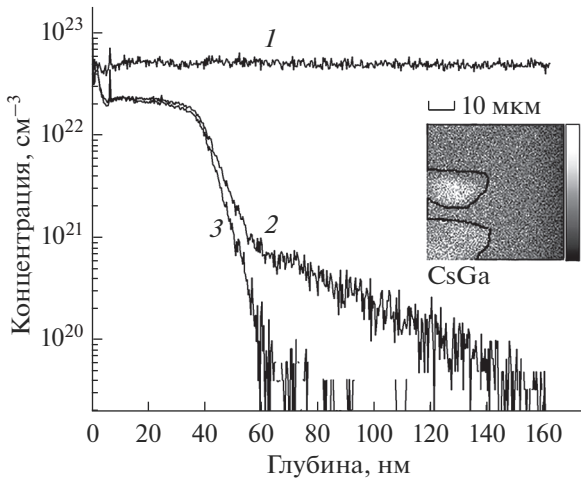


Рис. 4. Послойные профили плотностей Si (1) и Ga (2). Доза облучения Si пучком ионов 30 кэВ Ga равна 10^{18} ион/см². Исправленный профиль плотности Ga (3) (см. в тексте). На вставке микроскопическое изображение кратера анализируемой области во вторичных ионах Ga⁺.

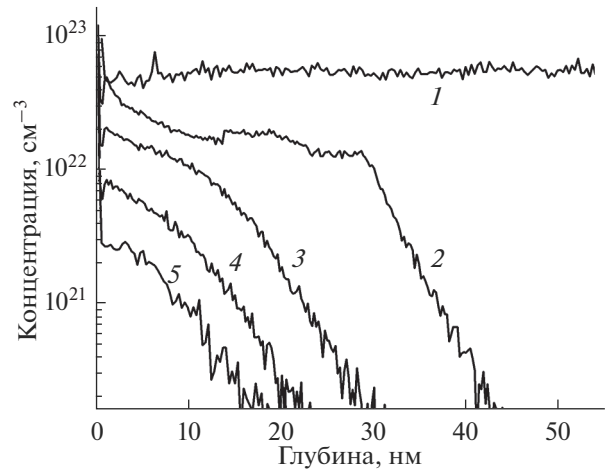


Рис. 5. Послойные профили плотностей Si – 1 и Ga в образцах, облученных при различных углах падения пучка ионов Ga⁺: 20° – 2, 40° – 3, 60° – 4, 80° – 5.

от поверхности до глубин, на которых плотность Ga уменьшается на порядок. Эти глубины соответствуют значениям $R_p + 2\Delta R_p$, где R_p – проективный пробег ионов и ΔR_p – продольный разброс. При нормальном падении ионов 30 кэВ Ga⁺ эти величины составляют 26 и 9 нм соответственно. Тогда относительная концентрация Ga в указанном слое Si: $C_{Ga} = N_{Ga}/(N_{Ga} + N_{Si})$, где N_{Ga} и N_{Si} интегральное содержание Ga и Si в слое.

На рис. 6 представлена угловая зависимость концентрации имплантированного галлия в приповерхностном слое кремния. Характер полученной кривой качественно совпадает с представленной на рис. 2 угловой зависимостью концентрации Ga на поверхности Si. Содержание Ga вблизи поверхности незначительно меняется до углов падения пучка $\theta = 20^\circ - 30^\circ$, после чего наблюдается более резкое уменьшение концентрации Ga. Однако значение C_{Ga} в приповерхностном слое почти в два раза меньше, чем на поверхности (при близких к нормали углах имплантации).

В работах [22, 23], где теоретически и экспериментально было показано, что плотность имплантированных первичных ионов вблизи поверхности после выхода распыления на стационарный режим (дозы облучения $> 10^{17}$ ион/см²) можно оценить по формуле:

$$N_p = N_T/Y, \quad (1)$$

где N_p и N_T – плотности имплантированных ионов и материала мишени, а Y – коэффициент распыления. Используя данную формулу можно вывести следующую:

$$C_p = 1/(1 + Y). \quad (2)$$

Экспериментально полученные методом ВИМС концентрации Ga в приповерхностном слое хорошо согласуются с выводами работы [22]. Так, при нормальном падении значение $C_{Ga} = 0.32$ близко к $C_{Ga} = 0.29$, вычисленной концентрации по формуле (2).

Угловая зависимость коэффициента распыления

Поскольку на значения коэффициентов распыления могут влиять условия облучения (способ растривания, время задержки пучка в точке, перекрытия) и доза облучения, были выполнены предварительные эксперименты по измерению Y

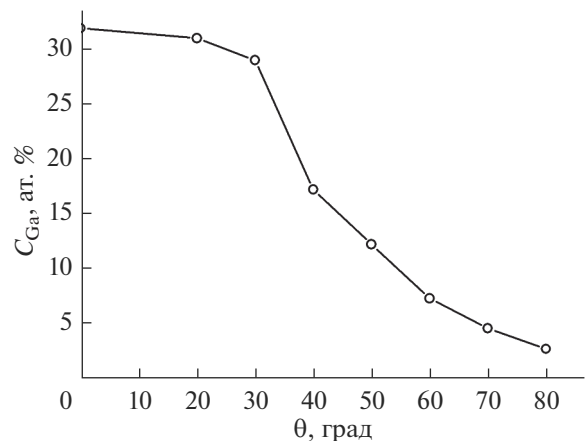


Рис. 6. Зависимость концентрации Ga в приповерхностном слое Si, облученного при различных углах падения пучка ионов Ga⁺.

Таблица 1. Результаты измерений и моделирования абсолютных значений коэффициентов распыления Si фокусированным ионным пучком Ga при различных углах падения ионного пучка

Угол распыления θ , град		0	20	30	40	50	60	70	80
Коэффициент распыления Y , атом/ион	Эксперимент	2.44	2.42	3.53	4.01	5.67	8.09	12.08	12.80
	TRIDYN	2.46	2.86	3.47	4.70	6.37	9.31	13.77	17.80

при различных дозах и условиях распыления при нормальном падении пучка. Серия экспериментов при растровом, серпантинном и произвольном типах сканирования, временах задержки 1 и 2 мкс, перекрытии пучка на 30 и 50% позволила получить значение коэффициента распыления и оценить погрешность измерений: $Y \approx 2.4 \pm 0.2$ атом/ион. При изменении дозы облучения от 10^{17} до 5×10^{18} ион/см² коэффициент распыления практически не изменяется. Кратеры распыления для измерения коэффициентов распыления (рис. 1) формировались при дозе облучения 2×10^{18} ион/см².

Результаты измерений абсолютных значений коэффициентов распыления Si фокусированным ионным пучком Ga при различных углах падения первичных ионов представлены в табл. 1.

На рис. 7 показана экспериментальная угловая зависимость коэффициентов распыления, нормированных на значение коэффициента распыления при нормальном падении ионного пучка. Видно, что при углах падения, больших 30° , наблюдается значительный рост коэффициентов распыления. При изменении угла падения до 80° его значение увеличивается практически в шесть раз. Аналогичное поведение угловой зависимости

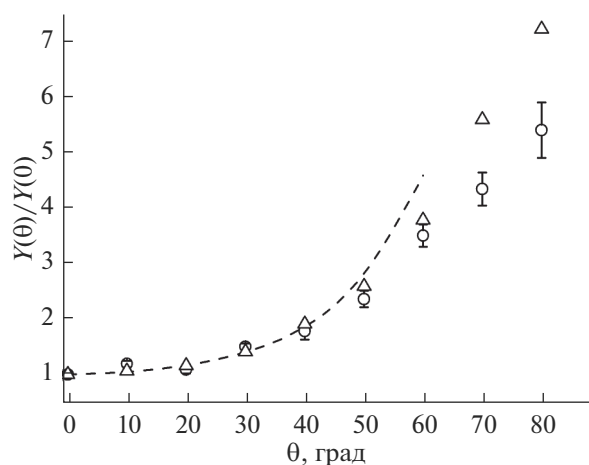


Рис. 7. Угловая зависимость коэффициента распыления Si пучком ионов 30 кэВ Ga^+ : \circ — данные экспериментов; — — — аппроксимация $\sim \cos^{-2.2} \theta$; \triangle — результаты расчетов в программе TRIDYN.

$Y(\theta)$ наблюдается в работе [11], где коэффициент распыления при 80° увеличивается в семь раз. Аналогичные зависимости получены для большинства материалов при распылении ионами инертных газов [3]. В этом случае ход кривой $Y(\theta)$ описывается каскадным механизмом П. Зигмунда [24], согласно которому $Y(\theta) \sim \cos^{-n}(\theta)$, где обычно $n = 1-2$. На рис. 7 представлена зависимость $\cos^{-2.2}(\theta)$, которая вплоть до углов 50° хорошо совпадает с экспериментальной зависимостью.

Смоделированная с помощью программы TRIDYN угловая зависимость $Y(\theta)$ достаточно хорошо согласуется с экспериментальной зависимостью до значений углов 60° .

Сопоставляя характер угловых зависимостей состава поверхностного слоя и коэффициента распыления, можно сделать вывод о том, что имплантированный галлий не оказывает существенного влияния на процесс распыления кремния, которое наблюдается в случае использования в качестве первичных химически активных ионов азота [25] и кислорода [26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были получены экспериментальные данные по угловым зависимостям состава поверхностного слоя и коэффициента распыления Si фокусированным ионным пучком Ga с энергией 30 кэВ.

Установлено, что при выходе распыления на стационарный режим (доза облучения $> 10^{17}$ ион/см²) состав приповерхностного слоя практически не меняется и содержит около 30 ат. % имплантированного галлия при нормальном падении пучка. Концентрация Ga незначительно уменьшается при изменении угла падения до $\theta \sim 30^\circ$. При дальнейшем росте θ наблюдается резкий спад содержания Ga до нескольких процентов при $\theta > 50^\circ$. Концентрация Ga на поверхности Si, определенная методами РЭОС и ВИМС более чем в два раза превышает содержание в приповерхностном слое, сравнимым с проективным пробегом ионов Ga^+ (при углах падения, близких к нормали). Этот факт может быть обусловлен ионно-инду-

цированными процессами во время проведения анализа.

В результате проведенных экспериментов была получена зависимость коэффициента распыления Si от угла падения ионного пучка. Исходя из полученной зависимости, можно сделать вывод о том, при углах падения, больших 30° , наблюдается значительный рост коэффициентов распыления. При изменении угла падения до 80° его значение увеличивается практически в 6 раз. Поведение угловой зависимости коэффициента распыления хорошо описывается теорией П. Зигмунда.

Полученные результаты по определению состава поверхностного слоя при нормальном падении ионного пучка и угловой зависимости коэффициента распыления Si фокусированным ионным пучком Ga хорошо согласуются с немногочисленными экспериментальными данными, представленными в литературе. Угловая зависимость состава поверхностного Si, облученного фокусированным ионным пучком Ga, получена впервые.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Ярославского Филиала Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № 0066-2019-0003 на оборудовании Центра коллективного пользования “Диагностика микро- и наноструктур”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bruchhaus L., Mazarov P., Bischoff L. et al.* // Appl. Phys. Rev. 2017. V. 4. № 1. P. 011302. <https://doi.org/10.1063/1.4972262>
2. *Joshi-Imre A., Bauerdick S.* // J. Nanotechnology. 2014. V. 2014. P. 170415. <https://doi.org/10.1155/2014/170415>
3. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Бериша Р. Вып. 1. М.: Мир, 1984. 336 с.
4. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Бериша Р. Вып. 2. М.: Мир, 1986. 488 с.
5. *Borgardt N.I., Rumyantsev A.V., Volkov R.L. et al.* // Mater. Res. Express. 2018. V. 5. № 2. P. 025905. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaace1>
6. *Румянцев А.В., Боргардт Н.И., Волков Р.Л.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. №6. С. 102. <https://doi.org/10.7868/S0207352818060197>
7. *Kim H.-B., Hobler G., Steiger A. et al.* // Nanotechnology. 2007. V. 18. P. 245303. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/24/245303>
8. *Borgardt N.I., Rumyantsev A.V.* // J. Vac. Sci. Techn. B. 2016. V. 34. P. 061803-1. <https://doi.org/10.1116/1.4967249>
9. *Borgardt N.I., Volkov R.L., Rumyantsev A.V. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2015. V. 41. P. 610. <https://doi.org/10.1134/S106378501506019X>
10. *Xu X., Della Ratta A.D. et al.* // J. Vac. Sci. Techn. B. 1992. V. 10. № 6. P. 2675. <https://doi.org/10.1116/1.586024>
11. *Frey L., Lehrer C., Ryssel H.* // Appl. Phys. A. 2003. V. 76. № 7. P. 1017. <https://doi.org/10.1007/s00339-002-1943-1>
12. *Lindsey S., Hobler G.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2013. V. 303. P. 142. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.12.087>
13. *Rommel M., Spolidi G., Yanev V. et al.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2010. V. 28. № 3. P. 595. <https://doi.org/10.1116/1.3431085>
14. *Gnaser H., Kallmayer C., Oechsner H.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 1995. V. 13 № 1. P. 19. <https://doi.org/10.1116/1.587978>
15. *Lehrer C., Frey L., Petersen S. et al.* // 2000 Int. Conf. on Ion Implantation Tech. Proc. 2000. P. 695. <https://doi.org/10.1109/IIT.2000.924248>
16. *Gnaser H., Brodyanski A., Reuscher B.* // Surf. Interface Anal. 2008. V. 40. № 11. P. 1415. <https://doi.org/10.1002/sia.2915>
17. *Habenicht K.P., Leib J. Koch et al.* // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. № 11. P. 115327-1. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.115327>
18. *Gnaser H., Reuscher B., Zeuner A.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2012. V. 285. P. 142. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.05.028>
19. *Wolfhard M.* TRIDYN. Version 7 – Dresden: Institute of Ion Beam Physics and Materials Research. Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. 2017. 35 p.
20. *Mootz T., Adriaens A., Adams F.* // Int. J. Mass Spectr. and Ion Proc. 1996. V. 156. P. 1. [https://doi.org/10.1016/S0168-1176\(96\)04410-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1176(96)04410-2)
21. *Бачурин В.И., Мелесов Н.С., Мироненко А.А. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 4. С. 38. <https://doi.org/10.1134/S0207352819040024>
22. *Carter G., Colligon J.S., Leck J.H.* // Proc. Phys. Soc. 1962. V. 79. № 2. P. 299. <https://doi.org/10.1088/0370-1328/79/2/308>
23. *Krimmel E.F., Pfeleiderer H.* // Rad. Effects. 1973. V. 19. № 2. P. 83. <https://doi.org/10.1080/00337577308232223>
24. *Sigmund P.* // Phys. Rev. 1969. V. 184. № 2. P. 383. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.184.383>
25. *Bachurin V.I., Lepshin P.A., Smirnov V.K.* // Vacuum. 2000. V. 56. № 4. P. 241. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(99\)00194-3](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(99)00194-3)
26. *Wittmaack K.* // Surf. Interface Anal. 2000. V. 29. № 10. P. 721. [https://doi.org/10.1002/1096-9918\(200010\)29:10<721::AID-SIA916>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1096-9918(200010)29:10<721::AID-SIA916>3.0.CO;2-Q)

Angular Dependencies of Silicon Sputtering by Gallium Focused Ion Beam

V. I. Bachurin¹, *, I. V. Zhuravlev¹, D. E. Pukhov¹, A. S. Rudy¹, S. G. Simakin¹,
M. A. Smirnova¹, A. B. Churilov¹

¹Valiev Institute of Physics and Technology of Russian Academy of Sciences, Yaroslavl Branch, Yaroslavl, 150007 Russia

*e-mail: vibachurin@mail.ru

The angular dependences of the composition of the surface layer and the sputtering yield of silicon are obtained upon irradiation of the surface with a focused beam of gallium ions with an energy of 30 keV. Analysis of the surface composition was carried out using scanning electron Auger spectroscopy and secondary ion mass spectrometry. Sputtering yields were determined by measuring the volume of sputtered craters and radiation doses. It was found that the content of gallium in the surface layer at angles of incidence close to the normal is about 30 at. %. At incidence angles greater than 30°, the concentration of gallium decreases quite sharply. The angular dependence of the sputtering yield of silicon does not correlate with the gallium content in the surface layer and is rather well described by the cascade sputtering mechanism of P. Sigmund.

Keywords: sputtering, focused ion beam, SIMS, AES.