

ИЗУЧЕНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ФАЗ В СТРУКТУРЕ Ti/Si С ПРИМЕНЕНИЕМ Хе МАРКЕРА

И.С.Ташлыков¹⁾, О.Г.Бобрович¹⁾, В.М.Вишняков²⁾, Дж.Картер³⁾

¹⁾Белорусский государственный технологический университет
220630 Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова 13-а, тел.: (017) 227-10-91, факс: (017) 227-62-17, 226-10-75

²⁾Шеффилд, Халлам университет

³⁾Салфорд, Салфордский университет

При изучении взаимопроникновения элементов подложки и тонкой пленки, получаемой методами ионно-ассистированного нанесения покрытий в условиях саморадиации (ИАНПУС), необходимо устанавливать границу раздела фаз в структуре пленка/подложка. С этой целью выполнены эксперименты с маркерными слоями ксенона, который имплантировался в кремниевые образцы с энергией 40 кэВ и дозами от 1×10^{14} см⁻² до 9×10^{14} см⁻². Образцы кремния с введенным маркером ксенона модифицировали методом ИАНПУС на основе металла титана. Энергия ассистирующих ионов титана составляла 7 кэВ. Подготовленные и модифицированные таким образом образцы исследовались методом резерфордского обратного рассеяния (ROR) ионов гелия с энергией 2 МэВ, а также применялось компьютерное моделирование с использованием программы RUMP. Анализ спектров ROR и компьютерное моделирование позволили обнаружить встречные потоки элементов матрицы в покрытие. Наряду с сопутствующими примесями углерода и кислорода в состав пленки на основе металла входит 10-15 ат. % кремния.

I. Введение

Ионная бомбардировка в процессе ионно-ассистированного нанесения покрытий в условиях саморадиации усиливает взаимное перемешивание на межфазной границе металл/кремний. Этот процесс и ряд других, например, силицидообразование являются предметом многочисленных исследований из-за широкого применения в новых электронных приборах [1].

Известны различные механизмы, которые дают вклад в процесс ионного перемешивания. При низкотемпературной модификации образцов преобладают ударные модели и модели теплового пика [2]. Ударные модели могут успешно объяснить результаты экспериментов по перемешиванию включая металлы с низкими атомными номерами [3], а так называемые модели теплового пика описывают ионное перемешивание на основе термодинамических параметров, таких как тепло перемешивания [4]. При режиме высокотемпературной модификации образцов, создаются большие плотности дефектов, которые усиливают подвижность атомов металла и кремния. В этом случае преобладает механизм радиационно-индуцированной диффузии в атомном перемешивании [5]. С другой стороны, отмечено [6, 7] сильное влияние химических движущих сил в экспериментах по ионному перемешиванию.

При изучении взаимопроникновения компонентов при модифицировании методом ИАНПУС стоит проблема установления границы раздела фаз в структуре пленка/подложка. С этой целью выполнены эксперименты с маркерными слоями ксенона, который, как известно [8], не растворяется в кремнии.

II. Основная часть

Подложки представляли собой Si (111) пластины кристалла. Половина пластины защищалась маской, во вторую половину имплантировался ксенон с энергией 40 кэВ. Интегральные потоки составляли от 1×10^{14} см⁻² до 9×10^{14} см⁻². Перед установкой в камеру они чистились в HF

методом ИАНПУС при комнатной температуре. Энергия ассистирующих ионов Ti⁺ была 7 кэВ. Средняя скорость нанесения покрытий на основе металла находилась в пределах от 0,16 нм/мин до 0,48 нм/мин. Давление в вакуумной камере при имплантации ионов Хе⁺ было 3×10^{-6} мм рт. ст., а давление в процессе осаждения покрытий составляло $\sim 10^{-3}$ мм рт. ст.

Состав образцов с имплантированным и нет маркером ксенона до и после модифицирования методом ИАНПУС исследовали методом ROR ионов гелия с энергией 2 МэВ. Угол рассеяния составлял 168°. Разрешение детектора было 25 кэВ. Дозы облучения ксенона определены непосредственно из экспериментов путем измерения слоевой концентрации имплантированного Хе.

Величины среднего проективного пробега элементов в матрице были рассчитаны при помощи компьютерной программы TRIM-89 [9].

Экспериментальные спектры смоделированы с использованием компьютерной программы RUMP [10].

В данной работе изучались две серии образцов кремния с покрытиями. Одна серия образцов имела имплантированные маркеры Хе. Покрытия осаждались одновременно на обе половины Si пластин. Экспериментальные спектры ROR от образцов Si с имплантированным маркером Хе и модифицированных затем методом ИАНПУС изображены на рис.1. Стрелками отмечены положения пиков элементов Si и Хе, которые находятся на поверхности. Данные положения пиков определены по спектрам ROR ионов гелия от исходных образцов кремния с имплантированным маркером ксенона. На спектрах ROR наблюдается смещение в сторону меньших номеров каналов сигналов выхода обратного рассеяния от кремния и ксенона, что указывает на изменение толщины пленки на поверхности при варьировании дозы Хе. Рисунок 1. Анализ энергетических спектров ионов гелия с помощью ИАНПУС образцов кремния с им-

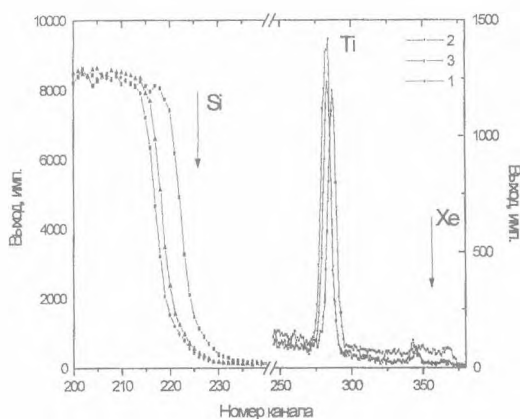


Рис.1. Спектры обратного рассеяния ионов гелия от образцов Si с имплантированным маркером Xe интегральными потоками: 1 - 1×10^{14} см $^{-2}$; 2 - 3×10^{14} см $^{-2}$; 3 - 9×10^{14} см $^{-2}$ и модифицированных затем методом ИАНПУС.

кислорода и углерода (Табл.1). Сигналы углерода и кислорода на спектрах POP обусловлены наличием в вакуумной камере при давлении $\sim 10^{-3}$ мм рт. ст. достаточного количества углерода и кислорода, которые могут взаимодействовать с атомами металла покрытия. С другой стороны, наличие в поверхностном слое кислорода может быть обусловлено внедрением кислорода, адсорбированного на поверхности электродов ионного источника и входящего в состав изоляционной керамики, которая состоит из смеси оксидов кремния, алюминия.

Таблица 1

Количественные характеристики состава структур, полученные при изучении образцов кремния с маркером Xe (образцы № 1-3) и без (образцы № 4-6), модифицированных методом ИАНПУС.

№	Инт-й поток Xe, см $^{-2}$	Слоевые концентрации, см $^{-2}$				N_{Ti} Nt $_{Ti}$	N_{Ti} Nt $_{Ti}$
		Ti, x10 16	Xe, x10 13	C, x10 17	O, x10 17		
1	1×10^{14}	2.1	1.7	2.0	0.9	9.2	4.4
2	3×10^{14}	5.3	5.1	2.9	1.9	5.4	3.5
3	9×10^{14}	7.9	16.8	3.3	1.5	4.2	1.9
4	-	1.3	-	1.8	0.7	13.1	5.3
5	-	3.6	-	2.5	0.7	7.1	2.0
6	-	4.6	-	2.6	1.0	5.7	2.2

Расчет относительных концентраций углерода и кислорода (по отношению к титану) показывает уменьшение значений $(N_{Ti})_C/(N_{Ti})_{Ti}$ и $(N_{Ti})_O/(N_{Ti})_{Ti}$ с увеличением дозы ксенона в матрице кремния (Табл.1).

Контроль за введением примесей осуществлялся с использованием метода POP и после имплантации ксенонового маркера. Анализ спектров POP при этом не выявил наличие каких-либо примесей в кремнии, кроме ксенона.

Используя компьютерное моделирование, были построены концентрационные профили исследуемых образцов после обработки ионно-ассистированным нанесением покрытий в условиях саморадиации (рис.2). Отметим, что глубина проникновения кислорода и углерода сравнима с глубиной проникновения титана в кремний [8].

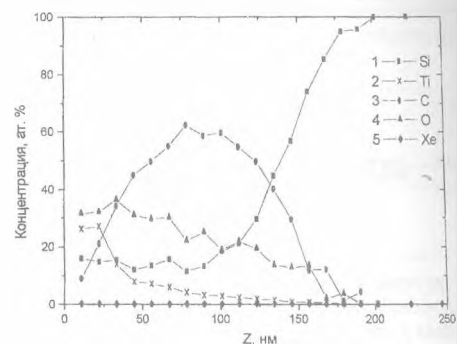


Рис.2. Профили распределения Si, Ti, C, O, Xe по глубине в образце кремния с имплантированным маркером Xe интегральным потоком 9×10^{14} см $^{-2}$ и модифицированного затем методом ИАНПУС.

Из анализа данных, приведенных в таблице 1, обнаруживается интересная особенность. Значение слоевых концентраций титана увеличивается с увеличением дозы ксенона в матрице кремния. Различие в значениях слоевых концентраций титана наблюдается также и в образце кремния без ксенона. В настоящее время объяснить обнаруженную особенность формирования покрытий достаточно сложно. Одной из вероятных причин изменения толщины покрытий можно назвать создание упругих напряжений в подложке с имплантированным Xe.

На рис.3 представлены глубинные концентрационные профили элементов в образцах, модифицированных методом ИАНПУС с введенным маркером ксенона.

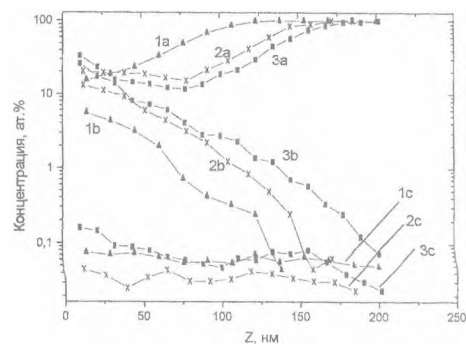


Рис.3. Профили распределения а - Si, б - Ti, в - Xe по глубине в образце кремния с имплантированным маркером Xe интегральными потоками: 1 - 1×10^{14} см $^{-2}$; 2 - 3×10^{14} см $^{-2}$; 3 - 9×10^{14} см $^{-2}$ и модифицированного затем методом ИАНПУС.

Анализируя полученные зависимости, следует отметить увеличение глубинного проникновения титана в кремниевую матрицу при увеличении интегрального потока ксенона. Такое поведение атомов титана возможно связано также со структурными нарушениями в облученном ионами ксенона кремнии. Существенную роль в этом случае может играть радиационно-индуцированная диффузия атомов титана в кремний, которая способствует ускорению процессов в области

пределение ксенона по глубине носит сопоставимый характер в образцах с разными дозами Xe. Имеется лишь обусловленное различием в дозе незначительное изменение в концентрации атомов Xe в анализируемом поверхностном слое.

Определяемое по спектрам РОР расстояние между пиками ксенона и кремния для образца кремния, имплантированного ионами Xe^+ и затем обработанного методом ИАНПУС в сравнении с этим же расстоянием для образцов кремния с имплантированным Xe, позволяет судить о взаимопроникновении элементов матрицы в покрытие и элементов покрытия в матрицу (табл.2).

Таблица 2

Номера каналов пиков обратного рассеяния элементов Ti , содержащихся на поверхности и расстояние между пиками ксенона и кремния $\Delta n_{\text{Si-Xe}}$ в образцах, имплантированных Xe и обработанных методом ИАНПУС (№ 1-3), только с осажденными покрытиями (№ 4-6) и в образцах с только имплантированным Xe (№ 7)

№	поток $\text{Xe}, \text{cm}^{-2}$	номера каналов пиков элементов Ti , содержащихся на поверхности			$\Delta n_{\text{Si-Xe}}$
		n_{Ti}	n_{Si}	n_{Xe}	
1	1×10^{14}	287	223	350	127
2	3×10^{14}	283	219	345	126
3	9×10^{14}	284	218	343	125
4	-	287	224	-	-
5	-	284	221	-	-
6	-	283	220	-	-
7	1×10^{14}	-	228	357	129

Как видно из приведенных в таблице результатов, расстояние между пиками ксенона и кремния $\Delta n_{\text{Si-Xe}}$ в исходных образцах с только имплантированным Xe (№ 7) составляет 129 каналов и это расстояние уменьшается в образцах, имплантированных Xe и затем обработанных методом ИАНПУС (№ 1-3). Далее, если рассчитать на сколько сместились пики ксенона и кремния после модификации методом ИАНПУС по сравнению с исходным образцом кремния с имплантированным Xe, то можно судить о характере миграции элементов матрицы и покрытия на межфазной границе. Например, для образца № 2

смещение пика Xe составляет $\Delta n_{\text{Xe}} = 357 - 3$ каналов, а смещение пика Si - $\Delta n_{\text{Si}} = 228 - 223$ каналов. Это указывает на то, что при модификации образцов методом ИАНПУС, кроме основной диффузии элементов покрытия в матрицу возникает встречный поток Si в пленку. Компьютерное моделирование показывает, что в пленку входит до 10-15 ат.% атомов кремния.

III. Заключение

В результате выполненных экспериментов удалось установить наличие встречных потоков элементов покрытия в матрицу и элементов матрицы в покрытие на межфазной границе пика/подложка. Расчет относительных концентраций углерода и кислорода в модифицированном образце ИАНПУС показывает уменьшение значений $(N_{\text{C}})/(N_{\text{Ti}})$ и $(N_{\text{O}})/(N_{\text{Ti}})$ с увеличением дозы ксенона в матрице кремния. Наряду с сопутствующими примесями углерода и кислорода в состав пленки на основе металла входят 10-15 ат.% кремния. Предварительные результаты свидетельствуют о влиянии упругих напряжений, вызванных введением в Si ксенона, на формирование осаждаемых покрытий.

Список литературы

1. L.S.Hung, J.W.Mayer, C.S.Pai and S.S.Lau // J.Appl.Phys., -1985.-58(4).-P.1527.
2. P.Borgesen, T.L.Alford, D.A.Lilienfeld and H.H.Johnson // Appl.Phys., -1990.-A50. P.161.
3. E.Ma, T.W.Workman, W.L.Johnson and M.A.Nicolet // Appl.Phys.Lett. -1989.-54.-P.413.
4. W.L.Johnson, Y.-T.Cheng, M.Van Rossum and M.-A.Nicolet // Nucl.Instr. and Meth. -1985.-B7/8.-P.657.
5. U.Shreter, F.C.T.So and M.-A.Nicolet // J.Appl.Phys., -1985.-55(10).-P.3500.
6. Z.L.Wang, J.F.M.Westendorp and F.W.Saris // Nucl.Instr. and Meth. -1983.-209/210.-P.125.
7. B.Rauschenbach, W.Erfurth, G.Linker and O.Meyer // Nucl.Instr. and Meth. -1992.-B68.-P.438.
8. P.Villars, A.Prince and H.Okamoto. Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams. -1996.-13808 p.
9. J.P.Biersack and L.G.Haggmark // Nucl.Instr. and Meth. -1980.-174.-P.250.
10. Doolittle // Nucl.Instr. and Meth. -1986.-B15. P.227.

STUDY Ti/Si INTERFACE FORMATION USING Xe MARKER

I.S.Tashlykov¹⁾, O.G.Bobrovich¹⁾, V.M.Vishnyakov²⁾, G.Carter³⁾

¹⁾Belorussian State Technological University, 13-a Sverdlova str., 220630 Minsk, Belarus, tel.:(+375-17) 227-10-91, fax:(+375-17) 227-62-17, 226-10-75

²⁾Sheffield Hallam University, MRI, Sheffield, UK

³⁾University of Salford, Joule Laboratory, Salford, UK,

Ion-beam mixing at the Ti/Si interface was investigated with 7 keV Ti^+ ions. The irradiations were carried out at room temperature during self-ion-assisted deposition of Ti-based coatings on Silicon. Xe marker layers were prepared by embedding of Xe using ion implantation of 40 keV Xe^+ ions, the doses ranging from $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ to $27 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Atomic intermixing was determined by means of Rutherford backscattering spectrometry. RBS data for concentration against depth were compared with data from the RUMP and the RBS codes simulation. Elemental analysis of the coatings shows a high concentration of carbon, hydrogen and silicon. The structures Ti/Si are found to have a deep penetration of Si (up to 10-15 at.%) in the coatings. This possibly indicates that the...