



ТРУДЫ

**Белорусского
государственного
технологического
университета**

*Издается с июля 1993 года
Выходит один раз в год*

Серия VI

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
НАУКИ И ИНФОРМАТИКА**

ВЫПУСК XIII

Учредитель – учреждение образования
«Белорусский государственный
технологический университет»

Минск 2005

О.Г. Бобрович, канд. физ.-мат. наук; И.С. Ташлыков, профессор;
Т.И. Глухатаренко, студентка

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

For determination of interface position during study of mutual components penetration of substrate and coating produced by self-ion-assisted deposition method, experiments with preliminary implanted Xe (40 keV, $9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) marker layers were carried out. The irradiations were carried out at room temperature during self-ion-assisted deposition of Ti-based coatings on silicon with 7 keV Ti^+ ions. Rutherford backscattering spectrometry (RBS) data for concentration against depth were compared with data from the RUMP and the RBS codes simulation. By the means of RBS analysis and computer simulation of scattering spectrum with the help of RUMP routine an opposing fluxes of matrix elements into the coating were detected.

Ионная бомбардировка в процессе ионно-ассистированного нанесения покрытий в условиях самооблучения (ИАНПУС) усиливает взаимное перемешивание на межфазной границе металлсодержащее покрытие – кремний. Этот процесс и ряд других, например силицидообразование являются предметом многочисленных изучений из-за широкого применения в новых электронных приборах [1].

При изучении взаимопроникновения элементов при модифицировании исследуемых материалов методом ИАНПУС стоит проблема установления границы раздела фаз в формируемой структуре покрытие – подложка. С этой целью выполнены эксперименты с маркерными слоями ксенона, который, как известно [2], нерастворим в кремнии и предложена методика для определения реальной границы раздела фаз в структуре покрытие – подложка.

Методика введения маркера Хе для определения реальной границы раздела фаз покрытие – подложка представлена на рис. 1.

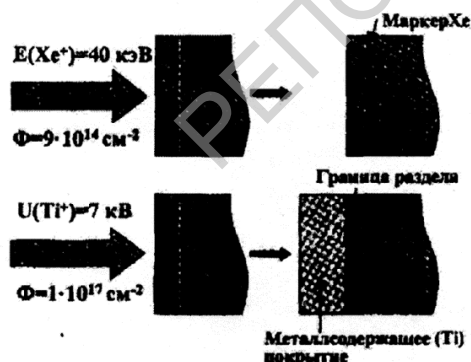


Рис. 1. Схема эксперимента по введению маркера Хе в кремний для определения реальной границы раздела фаз в структуре покрытие – подложка

Подложки представляли собой Si(100) пластины кристалла. Половина пластины за-

щищалась маской, во вторую половину имплантировался ксенон с энергией 40 кэВ с интегральным потоком $9 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Затем для упорядочения имплантированного слоя и устранения дефектов, возникших при имплантации ксенона, образец кремния отжигали при температуре $\sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$. После ионной имплантации и термической обработки образцы кремния с маркером Хе модифицируют при комнатной температуре методом ионно-ассистированного нанесения металлсодержащего покрытия в условиях ассистирования ионами титана при ускоряющем напряжении 7 кВ. Средняя скорость нанесения покрытий на основе металла находилась в пределах 0,4–0,5 нм/мин. Давление в вакуумной камере при имплантации ионов Хе⁺ было $4 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$, а давление в процессе осаждения металлсодержащего покрытия составляло $\sim 10^{-2} \text{ Па}$.

Состав исходных образцов и образцов с имплантированным маркером ксенона до и после модифицирования методом ИАНПУС исследовали методом РОР ионов гелия с энергией 2 МэВ и геометрией рассеяния $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 12^\circ$, $\theta = 168^\circ$. Разрешение детектора было 25 кэВ. Доза облучения ксенона уточнялась непосредственно из экспериментов путем измерения слоевой концентрации имплантированного Хе. Величины среднего проективного пробега элементов в матрице были рассчитаны при помощи компьютерной программы TRIM – 89 [3]. Экспериментальные спектры моделировались с использованием компьютерной программы RUMP [4].

В данной работе изучались две серии образцов кремния с покрытиями. Одна серия образцов имела имплантированные маркеры Хе. Покрытия осаждались одновременно на обе половины Si пластины. Экспериментальные спектры РОР ионов гелия от образцов Si с введенным имплантацией маркером Хе и модифицированных затем методом ионно-ассистированного нанесения покрытий в условиях самооблучения изображены на рис. 2.

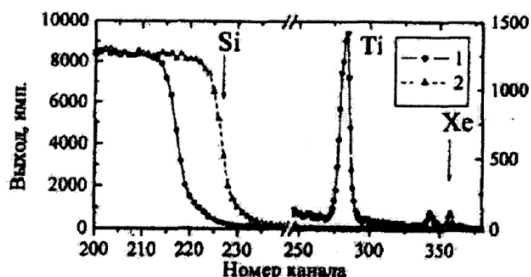


Рис. 2. Спектры обратного рассеяния ионов гелия от образцов Si с имплантированным маркером Xe до (2) и после (1) модифицирования нанесением металлосодержащего покрытия на основе Ti в условиях ассистирования ионами Ti^+

Стрелками на рисунке отмечены положения пиков элементов Si и Xe, которые находятся на поверхности и на глубине в кремнии, соответственно. Данные положения пиков определены по спектрам ROP ионов гелия от исходных образцов кремния с имплантированным маркером ксенона. На спектрах ROP, полученных от образцов с покрытиями, наблюдается смещение в сторону меньших номеров каналов сигналов выхода обратного рассеяния от кремния и ксенона, что указывает на появление тонкой пленки на поверхности кремния.

Анализ энергетических спектров ионов гелия от образцов кремния с имплантированным маркером Xe, модифицированных методом ИАНПУС, показал, что наряду с элементами титана и ксенона в созданных структурах покрытие – подложка содержит высокие концентрации кислорода и углерода (см. табл.).

Таблица

Концентрации элементов в образцах кремния с маркером Xe и без маркера, модифицированных нанесением покрытия на основе Ti в условиях ассистирования ионами Ti^+

Инт-й поток Xe, см ⁻²	Слоевые концентрации, см ⁻²					
	Ti, $\times 10^{16}$	Xe, $\times 10^{13}$	C, $\times 10^{17}$	O, $\times 10^{17}$	Ni _c , Ni _n	Ni _o , Ni _n
$9 \cdot 10^{14}$	7.9	16.8	3.3	1.5	4.2	1.9
–	4.6	–	2.6	1.0	5.7	2.2

Сигналы углерода и кислорода на спектрах ROP отражают наличие в вакуумной камере при давлении $\sim 10^{-2}$ Па достаточного количества углеводорода и кислорода в остаточном вакууме, которые могут взаимодействовать с атомами металла при осаждении покрытия.

При выполнении эксперимента нами также контролировался элементный состав подложки. Анализ спектров ROP при этом не выявил на-

личие каких-либо примесей в кремнии, кроме имплантированного ксенона.

Анализ данных, представленных в таблице, свидетельствует о том, что относительные слоевые концентрации углерода и кислорода $(Nt)_o/(Nt)_n$ и $(Ni)_o/(Ni)_n$ по отношению к титану сравнимы по величине с данными, полученными от образца, в который ионы ксенона не имплантировались.

С использованием компьютерного моделирования были построены концентрационные профили элементов в исследуемых образцах после обработки кремния ионно-ассистированным нанесением покрытий в условиях самооблучения. На рис. 3 представлены глубинные концентрационные профили элементов в модифицированных образцах с введенным маркером ксенона.

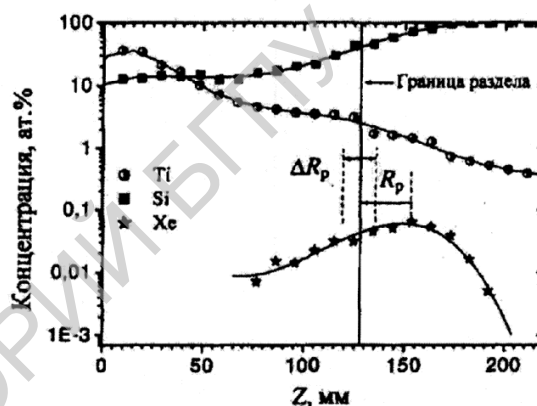


Рис. 3. Профили распределения Si, Ti, Xe по глубине в образце кремния с имплантированным маркером Xe и модифицированного затем ионно-ассистированным нанесением Ti

На представленном рисунке отчетливо виден пик ксенона. Для установления границы раздела фаз в структуре покрытие – подложка с применением компьютерной программы TRIM рассчитывается средний проективный пробег ионов ксенона в кремнии $R_p = 25,3$ нм и продольный разброс пробегов (продольный страгглинг) $\Delta R_p = 5,7$ нм. Затем от положения пика Xe (по шкале глубины), который наблюдается на глубинных концентрационных профилях элементов в кремнии, вычитается значение R_p . Так устанавливается реальное положение границы раздела фаз в сформированной структуре покрытие – подложка, точность которой определяется продольным страгглингом и лежит в пределах $\pm \Delta R_p$.

Таким образом, перестроив глубинные концентрационные профили элементов (рис. 4.) и выставив границу раздела фаз покрытие – подложка, мы получаем возможность обсуждать распределение элементов относительно

межфазной границы в создаваемых структурах покрытие – подложка, как в покрытии, так и в подложке.

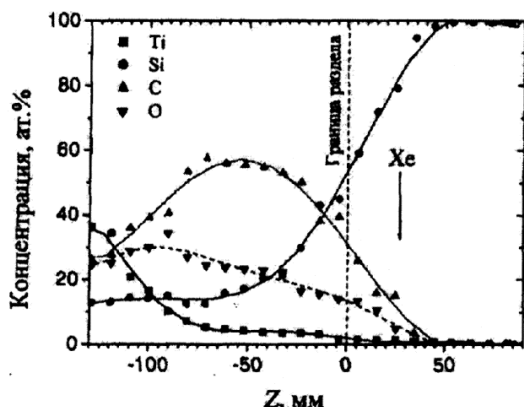


Рис. 4. Профили распределения Si, Ti, C, O по глубине в покрытии и в образце кремния с имплантированным маркером Хе и модифицированного затем ионно-ассистированным нанесением Ti

Как видно из рис. 4, по всей толщине осажденного покрытия содержится кремний с концентрацией 12–14 ат.%, которая увеличивается к межфазной границе покрытие – подложка. Отметим также, что глубина распределения кислорода и углерода сравнима с глубиной распределения титана в кремний [4]. Обнаруженное поведение атомов титана, по-видимому, связано с влиянием плотности выделяемой энергии (0,22 эВ/атом) в каскаде атомных столкновений на взаимопроникновение компонентов при осаждении покрытий на кремний [5]. Таким образом, в состав получаемых металлосодержащих покрытий на кремнии входят атомы наносимого металла (Ti) технологических примесей углерода и кислорода из вакуумной камеры, а также Si в результате встречной диффузии.

В результате выполнения работы разработана новая методика введения маркера в подложку предварительной ионной имплантацией ксенона для определения границы раздела фаз покрытие – подложка. Данная методика в сочетании с резерфордовским обратным рассеянием ионов гелия позволила установить реальную границу, точность которой определяется страгглингом пробега ($\pm 5,7$ нм) ионов ксенона в кремнии, между металлосодержащим покрытием и кремниевой подложкой и выявить процессы взаимопроникновения элементов покрытия в глубь подложки и встречной диффузии элементов подложки в покрытие.

Литература

1. Hirvonen J. K. Ion beam assisted thin film deposition: Fundamentals and Applications of IBA Processing // Materials and Processes for Surface and Interface Engineering / Y. Pauleau (ed.). – Netherlands: Kluwer Academic Publishers. – 1995. – P. 307–346.
2. Villars P., Prince A., Okamoto H. Handbook of ternary alloy phase diagrams. – Oh.: ASN International. – 1996. – 13808 p.
3. Biersack J. P., Haggmark L. G. A Monte Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets // Nucl. Instr. Meth. – 1980. – Vol. 174. – P. 257–269.
4. Doolittle L. R. A semiautomatic algorithm for Rutherford backscattering analysis // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. – 1986. – Vol. B15. – P. 227–231.
5. Бобрович О. Г., Ташлыков И. С. Изучение состава металлосодержащих (Co, Mo, W) покрытий, осажденных на кремний в условиях ионного ассистирования методом POP // Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах: Труды IV Междунар. науч. конф., Томск, 12–19 авг. 2004 г. / ТПУ. – Томск, 2004. – С. 168–171.