

О. Г. Бобрович, ст. преподаватель; И. С. Ташлыков, профессор;
О. М. Михалкович, аспирант

ПОВРЕЖДЕНИЕ СТРУКТУРЫ КРЕМНИЯ ПРИ ИОННО-АССИСТИРОВАННОМ ОСАЖДЕНИИ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩЕГО ПОКРЫТИЯ В УСЛОВИЯХ САМООБЛУЧЕНИЯ

This paper discussed an dose dependence of a damage in Si during self ion-assisted deposition of a thin metal (Ti) films. RBS/channeling technique was applied to investigate a depth distribution of the damage. It is observed that a concentration of defects increases with a dose of ions at comparable energies of assisting ions Ti^+ . The maximum concentration displaced of clusters of atoms of silicon obtained at an implantation of ions Xe^+ decreases at the subsequent self ion-assisted deposition of coating, that contacts to an activation of migratory processes into the depth of silicon at heightened energy release (0,22 ev/atoms) in the stage of atomic collisions.

Введение

Ионно-ассистированное нанесение тонких пленок на подложку сопровождается радиационным повреждением поверхности из-за торможения ассистирующих ионов с образованием в подложке каскадов атомных столкновений на начальной стадии процесса осаждения [1–3]. Поэтому актуальным представляется исследование радиационных дефектов в кремнии, поверхность которого модифицировалась ионно-ассистированным осаждением металлосодержащих покрытий. В наших экспериментах мы используем метки ксенона для определения исходной поверхности подложки кремния и изучения повреждения кристалла кремния при нанесении металлосодержащих покрытий. Ионная бомбардировка в процессе ионно-ассистированного нанесения покрытий в условиях самооблучения (ИАНПУС) усиливает взаимное перемешивание на межфазной границе металлосодержащее покрытие – кремний. Этот процесс и ряд других, например силицидообразование, являются предметом многочисленных изучений из-за широкого применения в новых электронных приборах [4, 5].

Методика эксперимента

Подложки представляли собой пластины кристалла Si (100). Половина пластины защищалась маской, во вторую половину имплантировался ксенон с энергией 40 кэВ и с интегральным потоком $9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. После имплантации Xe метка маска с одной половины пластины Si снималась и затем на обе половины образца кремния осаждали металлосодержащее (Ti) покрытие при комнатной температуре, используя метод ИАНПУС при ускоряющем напряжении 7 кВ для ассистирующих ионов титана. Средняя скорость нанесения покрытий на основе металла находилась в пределах 0,4–0,5 нм/мин. Давление в вакуумной камере при имплантации ионов Xe^+ было $4 \cdot 10^{-4}$ Па, а давление в процессе осаждения металлосодержащего покрытия составляло $\sim 10^{-2}$ Па.

Таким образом, в данной работе изучались две серии образцов кремния с покрытиями. Одна серия образцов кремния имела имплантированные метки Xe, а другая – нет.

Повреждение исходных образцов кремния и образцов кремния с имплантированной меткой ксенона до и после модифицирования методом ИАНПУС изучали методом резерфордовского обратного рассеяния ионов гелия в сочетании с каналированием (РОР/КИ) 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 Xe. Величины среднего проективного пробега элементов в матрице были рассчитаны при помощи компьютерной программы TRIM-89 [6].

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны осевые спектры ОР в области 210–230 каналов от кристаллов (100) Si, модифицированных ионно-ассистированным нанесением Ti в условиях самооблучения.

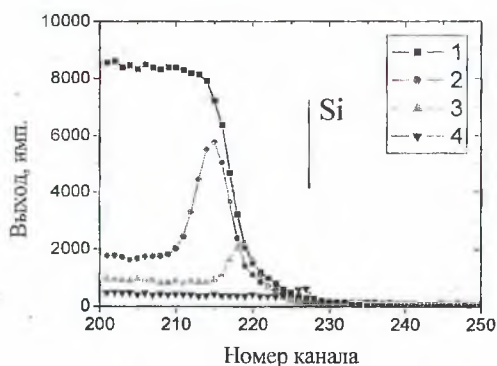


Рис. 1. Спектры РОР/КИ от кристаллов (100) Si, модифицированных методом ИАНПУС: 1 – спектр в неориентированном направлении от образца Si с меткой Xe (доза $9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$); спектры в режиме каналирования вдоль направления $\langle 100 \rangle$ от образца Si с меткой Xe (доза $9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) (спектр 2) и от образца Si без метки Xe (спектр 3); 4 – спектр от исходного кристалла кремния

Осевой выход, связанный с повреждением в кристалле, увеличивается в случае образца Si с меткой Xe (спектр 2, рис. 1) по сравнению с образцом Si без метки Xe (спектр 3, рис. 1), что свидетельствует о дополнительном внесении повреждений в кристалл кремния при осаждении металлсодержащего покрытия. Вместе с тем пик (спектры 2 и 3) повреждений смещается в глубину относительно поверхности исходного кремния, отмеченной стрелкой (спектр 4) на рис.1, что соответствует росту на поверхности кристалла кремния металлсодержащего покрытия.

Расчет слоевых концентраций дефектов, выполненный по спектрам РОР/КИ, показывает, что, как и ожидалось, с увеличением дозы имплантируемых в кремний ионов Xe от $1 \cdot 10^{14}$ до $27 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с последующим нанесением покрытий Ti на кремний слоевое содержание дефектов в кремнии также увеличивается от $9,5 \cdot 10^{16}$ до $18,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Характер повреждения на спектрах РОР (рис. 1) каналированных ионов отражает тот факт, что кремний повреждается лишь в начальный момент времени модифицирования

образца. Действительно, если бы это было не так, то намного раньше, чем при дозах $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, должна была бы наступить аморфизация поверхностного слоя кремния, а этого не наблюдается. Так, выход осевых спектров ОР на рис. 1 не достигает выхода случайного спектра ОР, т. е. доза ассистирующих ионов титана, падающих на кремний, меньше дозы аморфизации.

На рис. 2 приведено распределение концентрации радиационных дефектов в кремнии по глубине, рассчитанное на основе спектров РОР/КИ от образцов Si, с Xe меткой и без нее, модифицированных ионно-ассистированным нанесением металлсодержащих покрытий на основе титана. Глубинные профили дефектов нормированы на поверхность исходного кремния, которая устанавливается согласно методике, описанной нами ранее в статье [7].

Глубина максимальной концентрации дефектов, производимых при нанесении металлсодержащих покрытий на кремний (линия 3), сравнима с глубиной проникновения ионов Ti^+ с соответствующими энергиями в кремнии, которая рассчитана по программе TRIM.

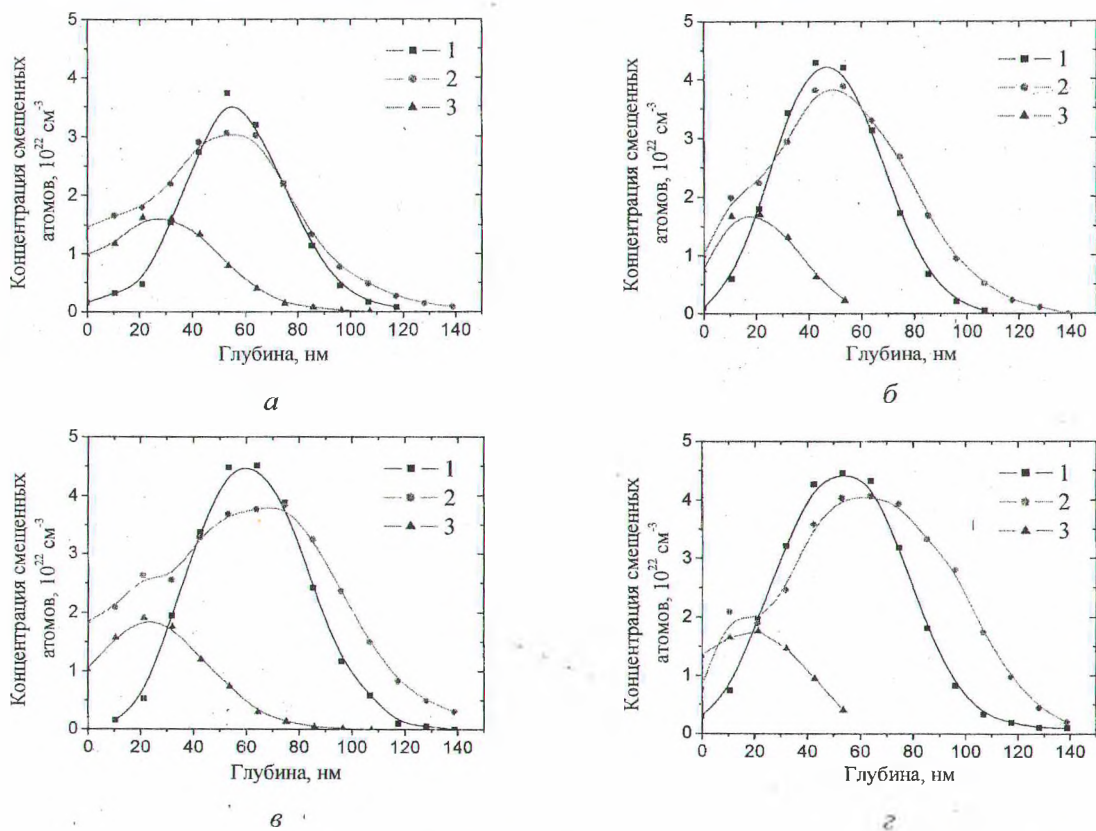


Рис. 2. Распределение концентрации дефектов по глубине в кремнии после: 1 – имплантации ионов Xe с $E = 40 \text{ кэВ}$ и дозами $D = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (а), $D = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (б); $D = 9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (в) и $D = 27 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (г); 2 – ионно-ассистированного осаждения металлсодержащего (Ti) покрытия на кремний с имплантированным Xe при ускоряющем напряжении 7 кВ для ассистирующих ионов Ti^+ ; 3 – только ионно-ассистированного нанесения Ti в условиях самооблучения при ускоряющем напряжении 7 кВ

Так, для ассистирующих ионов титана средний проективный пробег и страгглинг пробега составляет $R_p \pm \Delta R_p = 14,7 \pm 6,2$ нм. Осаждение покрытий на кремний с имплантированной меткой Хе приводит к размытию профиля повреждений и миграции дефектов в кремнии на большие глубины, это свидетельствует о том, что процессы являются радиационно активируемыми в результате управляемого энерговыделения (0,22 эВ/атом) в каскаде атомных столкновений при нанесении покрытия в условиях ассистирования ионами Ti^+ . Максимальная концентрация смещенных из узлов атомов кремния, полученная при имплантации ионов Хе⁺, уменьшается при последующем нанесении покрытия в условиях ассистирования ионами Ti^+ , что также связывается с активацией миграционных процессов в глубь кремния при повышенном энерговыделении.

Выводы

С использованием метода резерфордского обратного рассеяния в сочетании с каналированием установлено, что концентрация смещенных из узлов атомов кремния увеличивается с увеличением дозы имплантированных ионов ксенона при одинаковых энергиях ассистирующих ионов Ti^+ в процессе ионно-ассистированного нанесения металлсодержащего покрытия. Максимальная концентрация смещенных из узлов атомов кремния, полученная при имплантации метки Хе, уменьшается при осаждении покрытия в условиях ассистирования ионами Ti^+ , это связывается с активацией процессов проникновения ксенона в глубь кремния при повышенном энерговыделении (0,22 эВ/атом), а также с тем, что процессы миграции дефектов на большие глубины являются радиационно активируемыми.

1. Бобрович О. Г., Ташлыков И. С. Формирование покрытия на кремний ионно-ассистированным нанесением Zr в условиях самооблучения // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 6-й Междунар. конф., Минск, 28–30 сент. 2005 г. / БГУ. – Минск, 2005. – С. 282–284.

2. 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.

3. Colligon J. S. Energetic condensation: Processes, properties, and products // J. Vac. Technol. – 1995. – Vol. A13. – P. 1649–1657.

4. Baglin J. E. Interface structure, adhesion, and ion beam processing // Materials and Processes for Surface and Interface Engineering / Y. Pauleau (ed.). – Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995. – P. 111–149.

5. Ion beam assisted deposition of niobium nitride thin films for vacuum microelectronics devices. Y. Gotoh, M. Nagao, T. Ura e.a. // Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. – 1999. – Vol. 148. – P. 925–929.

6. 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.

7. Бобрович О. Г., Ташлыков И. С., Глухатаренко Т. И. Изучение границы раздела фаз в структуре Ti–Si с применением Хе маркера // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. – 2005. – Вып. XIII. – С. 90–92.