

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ИОНОВ И ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛЕГИРОВАНИЯ АТОМАМИ ПЛЕНОК Al, Ti, Fe, Mo ПОДЛОЖКИ МЕТОДОМ ИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Д.А. Сафонов, А.С. Яшин, Н.В. Волков, Б.А. Калинин
 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
 Каширское шоссе 31, Москва, Россия, nvvolkov@mail.ru

Целью настоящей работы явилось изучение влияния энергии и дозы облучения на эффективность модифицирования приповерхностных слоев монокристаллических материалов Si, Mo атомами пленок, которые внедрялись методом ионного перемешивания под воздействием пучка ионов аргона с широким энергетическим спектром $E_{\min}-E_{\max}=0.5-5$ кэВ, средняя энергия 3 кэВ, температура облучения не превышала 100°C.

Показано, что глубина внедрения X_m линейно зависит от дозы облучения в интервале величин $\Phi=(0.5-10) \cdot 10^{18}$ ион/см², а распределение внедренных атомов пленок $C(x)$ имеет несколько максимумов. Первый максимум соответствует максимальной глубине пробега ионов аргона со средней энергией $\chi(<E>)$, второй максимум находится в области пробега ионов с максимальной энергией $\chi(E_{\max})$, а появление третьего и последующих максимумов обусловлено радиационно-стимулированными процессами, в том числе распределением механических напряжений по глубине, взаимодействием внедряемых атомов между собой и атомами подложки, наличием и распределением точечных дефектов).

Введение

Одним из эффективных методов модифицирования приповерхностных слоев материалов является метод ионного перемешивания [1]. Модифицирование поверхности подложки происходит в результате облучения пучком ускоренных ионов (как правило, Ar⁺) подложки, на поверхность которой напылены в вакууме один или несколько слоев пленок, атомы которых и предполагается внедрять. Для повышения эффективности внедрения атомов из напыленных пленок необходимо снижать их скорость распыления и одновременно стремиться увеличить глубину внедрения в подложку, например, за счет радиационно-стимулированных процессов и физико-химического взаимодействия [2-4].

Целью настоящей работы явилось изучение влияния процесса распыления системы «пленка-подложка» при модифицировании приповерхностных слоев монокристаллов Si и Mo в режиме ионного перемешивания под пучком ионов аргона с широким энергетическим спектром.

Методика экспериментов

Модифицирование поверхности образцов производилось на установке ИЛУР-03 [5] с разрядной камерой, позволяющей облучать образцы пучком ионов с широким энергетическим спектром (шэс) $E_{\min}-E_{\max}=0.5-5$ кэВ, средняя энергия 3 кэВ, доза облучения $(0.5-10) \cdot 10^{18}$ ион/см², температура облучения не превышала 100°C. Установка оснащена тремя магнетронами, позволяющими напылять тонкие пленки металлов в атмосфере инертного газа при давлении рабочего газа выше 10^{-4} Па.

Для изучения особенностей распыления и поведения атомов пленок в подложке при облучении пучком ионов с широким энергетическим спектром были выбраны материалы с различным отношением атомных радиусов «пленка-подложка» ($\alpha=r_1/r_2$, r_1 - атомный радиус имплантированного атома, r_2 - атомный радиус атомов мишени-подложки) атомы пленок – Al, Ti, Fe, Mo; атомы подложек – Si, Mo.

Энергия первично-выбитых атомов определяется соотношением $E_{\text{пва}}=\mu_0 \langle E \rangle$, где $\mu_0=2 \times M_0 \times M_1 / (M_0 + M_1)^2$, M_0 - атомная масса иона Ar, M_1 - атомная масса материала пленки.

Было изготовлено четыре основные группы образцов, находящихся в следующих состояниях: в штатном состоянии, шероховатость поверхности $R_a=0.7 \pm 0.3$ мкм; полированной внешней поверхностью пучком ионов аргона $R_a = 0.2 \pm 0.1$ мкм; легированной атомами из однослойных пленок Al, Ti, Fe, Mo и двухслойных AlTi, FeMo и MoFe, методом ионного перемешивания. Толщина одного слоя пленок составляла $\approx 40 \pm 10$ нм.

Изучение изменений рельефа поверхности образцов выполнено с помощью профилографов ПП-210 и α -Step (радиус острия индентора ≈ 1.0 мкм, порог чувствительности 5 нм), растровых электронных микроскопов Strata-235, "OXFORD-LINK" (UK).

Распределение внедренных атомов приповерхностном слое образцов осуществлялось методом ВИМС на приборах HP-660 и STRATA-235 (с порогом чувствительности по содержанию элементов $C \approx 0.001$ ат. %).

Для оценки влияния скорости распыления при облучении под углом измерены величины коэффициентов распыления $Sp(\alpha)$ материалов, которые определялись тремя методами: весовой метод - по потере веса образца, методом ступеньки (высота ступеньки на границе распыленной и защищенной областей) по величине распыленного материала, удаленного с поверхности мишени в процессе облучения; методом фотометрирования – по изменению прозрачности стеклянного коллектора в результате осаждения на него распыленных атомов от мишени. Погрешность измерений $\pm(30 - 50)\%$.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как известно [6], коэффициент распыления S_p связан с параметрами следующей зависимостью:

$$S_p(E) \approx \frac{\Delta x \times F_q(E)}{\pi^2 U_0}, \quad (1)$$

где $F_q(E)$ – энерговыделение в слое материала Δx .

Величина энерговыделения в линейном приближении может быть рассчитана как $F_q(E) \approx \langle E \rangle / \langle x \rangle$, где $\langle x \rangle$ – усредненный пробег ионов и его можно рассчитывать как проективный пробег ионов с энергией E_i в массивной матрице, т.е.

$$R_{pi} \approx \frac{R(E_i)}{1 + 0,36 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{1,15}}, \quad (2 \text{ и } 3)$$

$$R(E_i) = \frac{1}{N_0} \int_0^{E_i} \frac{dE}{s_n(E) + s_e(E)},$$

где $R(E_i)$ – полный пробег иона с энергией E_i , $s_n(E)$ – сечение упругого взаимодействия, $s_e(E)$ – сечение неупругого взаимодействия, N_0 – атомная плотность материала.

Как показывают оценки величин энерговыделения при облучении пучком ионов материалов с широким энергетическим спектром (рис. 1) на глубинах $x = 0 - R_p \langle E \rangle$ оказывается ниже по сравнению с облучением моноэнергетическим пучком тех же ионов с энергией равной $\langle E \rangle$. При этом каскады смещений в подложке наблюдаются на глубинах порядка $(2-3)R_p(E_{max})$. Однако увеличение энергии ионов приводит к росту скорости распыления и, следовательно, общее количество внедренных атомов в матрицу снижается.

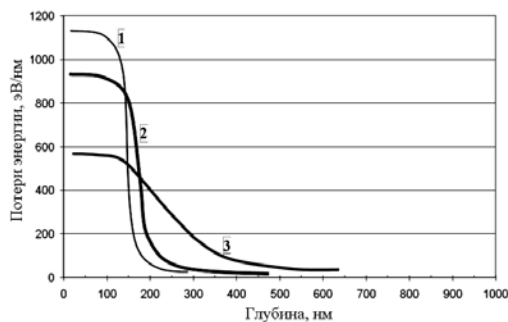


Рис. 1. Удельные потери энергии ионов Ar^+ на упругие взаимодействия в кремнии: 1 – $\Delta E/E = 5\%$, $\langle E \rangle = 10$ кэВ; 2 – $\Delta E/E = 35\%$, $\langle E \rangle = 10$ кэВ; 3 – $\Delta E/E = 50\%$, $\langle E \rangle = 15$ кэВ

С другой стороны, как ранее показано [7, 8], проникновение атомов пленок в подложку определяется радиационно-стимулированными процессами, которые могут быть учтены в рамках модели изотропного перемешивания через энергообмен между внедряемыми ионами пучка, первично-выбитых атомов пленок и подложки, т.е. определяется каскадами смещений.

В качестве параметра, характеризующего процесс ионного перемешивания, был выбран параметр – коэффициент эффективности процесса ионного перемешивания B ($nm^5/эВ$) [6], который определялся по следующей формуле:

$$B = \frac{X_m}{\Phi F_q} \quad (4)$$

где X_m – глубина внедрения, Φ – доза облучения, F_q – энерговыделение в модифицируемом слое толщиной $\approx R_p$.

В общем случае распределение внедряемых атомов в режиме ионного перемешивания с

мощью атомов отдачи можно представить в виде выражения [2]:

$$C(x) = A \exp(-x/l), \quad (5)$$

где l – длина «затухания», A – параметр внедрения. Параметры l и A могут быть определены по следующим формулам:

$$l = 0,357 E_0 \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2},$$

$$A = 8,7 \cdot 10^7 \Phi \frac{(M_1 + M_2)^2}{4x_t M_1 M_2} \exp\left(-\frac{\ln(R_p/x_t)^2}{0,51}\right), \quad (6 \text{ и } 7)$$

где E_0 – энергия атома отдачи, R_p – проективный пробег ПВА в материале, x_t – толщина пленки, Φ – доза облучения.

В качестве примера на рис. 2 представлены экспериментальные зависимости содержания внедренных атомов Fe в подложке при облучении пучками ионов Ag^+ с широким энергетическим спектром, и кривые, построенные по модели «логарифмического затухания» (5). Максимальная глубина внедрения X_m увеличивается пропорционально с ростом дозы облучения: $\Phi = (1 \text{ и } 2) \cdot 10^{18}$ ион/см² – $X_m = 36 \pm 2$ и 60 ± 2 нм, соответственно.

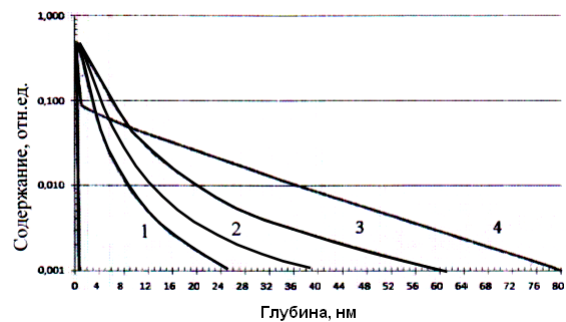


Рис. 2. Распределение атомов Fe в подложке при облучении пучком Ag^+ : 1 – расчетный профиль $C(x)_\Sigma$ для пучка ионов Ag^+ с широким энергетическим спектром; 2, 3 – экспериментальные данные, доза облучения $\Phi = (1 \text{ и } 2) \cdot 10^{18}$ ион/см² соответственно; 4 – модель логарифмического затухания (распыление не учитывается)

На рис.3 представлены характерные распределения внедренных атомов двухслойной пленки AlTi в монокристаллический кремний. Из которого следует, что общее содержание атомов Al выше по сравнению с Ti. При этом выявляются максимумы в распределениях $C(x)$ на глубинах в области: Al – 6 и 11 нм; Ti – 2-3 нм.

Анализ положения выявленных неоднородностей $C(x)$ показывает, что их наличие возможно связано с характерными пробегами ионов Ag^+ в системе «пленка-подложка». Например, это хорошо наблюдается для атомов Al – $\langle E \rangle = 3$ кэВ ($R_p \approx 6$ нм) и $E_{max} = 5$ кэВ ($R_p \approx 10-11$ нм). При этом $C(x)$ у атомов Ti выявляется только один пик в области 3 мкм и глубина внедрения составляет величину $X_m \approx 6$ нм близкую к пробегу ионов Ag^+ со средней энергией $\langle E \rangle = 3$ кэВ ($R_p \approx 6$ нм).

Заключение

Таким образом, в результате проведенных экспериментов показано, что с ростом дозы облучения (в интервале величин $\Phi = (0.5-10) \cdot 10^{18}$

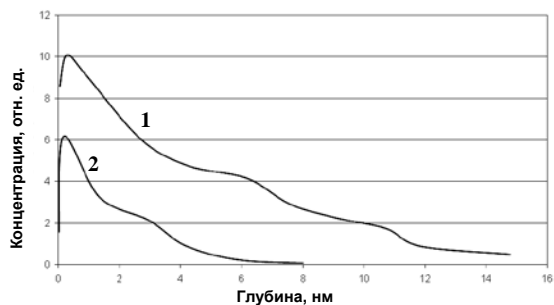


Рис. 3. Распределение в Si внедренных атомов из двухслойной пленки AlTi при облучении пучком ионов Ar^+ дозой $1.2 \cdot 10^{18}$ ион/см² (зависимости $C(x)$ 1 – Al, 2 – Ti)

ион/см²) глубина внедрения атомов пленок X_m увеличивается, по зависимости близкой к линейной от Φ , а распределение внедренных атомов пленок $C(x)$ имеет несколько максимумов. Первый максимум соответствует проективному пробегу ионов аргона со средней энергией $\chi(\langle E \rangle)$, второй максимум находится в области пробега ионов с максимальной энергией $\chi(E_{\max})$, а появление третьего и последующих максимумов обусловлено радиационно-стимулированными процессами, в том числе

распределением механических напряжений по глубине, взаимодействием внедряемых атомов между собой и атомами подложки, наличием и распределением точечных дефектов).

Список литературы

1. Sigmund P. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. P. 7261–7267.
2. Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы. М.: Металлургия. 1990.
3. Darken L.S., Gurry R.W. Physical Chemistry of Metals, Inc. New York Toronto London, Mc. Granw-Hill Book Company. 1953.
4. Шалаев А.М. Радиационно-стимулированная диффузия в металлах. М.: Атомиздат. 1972.
5. Калинин Б.А., Волков Н.В., Валиков Р.А., Якуткина Т.В., Яшин А.С. // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80. № 2. С.165-167.
6. Sigmund P., Grass-Marti A. // J. Nucl. Instr. Meth. 1980. V. 95. P.385–390
7. Sigmund P., Gras-Marti A. // J. Nucl. Instr. Meth. 1980. V. 168. P.389-394.
8. Калинин Б.А., Волков Н.В., Олейников И.В. // Поверхность. 2004. № 8. С.48-52.

THE INFLUENCE OF ION ENERGY AND IRRADIATION DOSE ON THE EFFICIENCY DOPING OF SUBSTRATES BY Al, Ti, Fe, Mo ATOMS OF FILMS BY ION MIXING

Dmitiy Safonov, Aleksandr Yashin, Nikolay Volkov, Boris Kalin
NRNU "MEPhI", 31 Kashirskoe sh., Moscow, Russia, nvvolkov@mail.ru

In the present work was conducted to study the influence of dose and ion energy in the beam on the efficiency of modifying by atoms of the films near-surface layers of single crystalline Si and, Mo materials.

The atoms of the films were embedded in substrates by ion mixing under the influence of argon ion beam with a wide energy range E_{\min} – E_{\max} =0.5–5 keV, the mean energy is 3 keV, the temperature of radiation not exceed 100°C.

It is shown that the penetration depth X_m is linearly dependent on the radiation dose in the range of values $\Phi=(0.5-10) \cdot 10^{18}$ ion/cm², and the distribution of embedded atoms films $C(x)$ has multiple maxima.

For example, the introduction of Al atoms into the single crystal Si-substrate is shown that the first maximum of distribution corresponds to the depth of the run the argon ions with an mean energy of $\chi(\langle E \rangle)$. The second maximum is in the region of the run ions with a maximum energy of $\chi(E_{\max})$.

The appearance of the third peak and subsequent peaks are due to radiation-stimulated processes including due to the influence of mechanical stresses on the depth of the substrate, the interaction of introduced atoms between themselves and with atoms of the substrate, the presence and distribution of point defects.