

## ПРОЦЕССЫ ИОННО-АССИСТИРУЕМОГО ОСАЖДЕНИЯ СЛОЕВ МЕТАЛЛОВ В ОДНОПУЧКОВОЙ СИСТЕМЕ

Ф.Ф. Комаров<sup>1)</sup>, А.Ф. Комаров<sup>1)</sup>, П.Жуковски<sup>2)</sup>, А.А.Комаров<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко, ул. Курчатова, 7, 220064, Минск, Беларусь. e-mail: komarovF@bsu.by

<sup>2)</sup>Люблинский технический университет, г.Люблин, Польша

<sup>3)</sup>Институт физики твердого тела Йенского университета им. Ф. Шиллера, Д-07743, Йена, Германия

Создана система моделирования процессов ионной имплантации и осаждения слоев различных материалов на металлы одним и тем же пучком. Данный комплекс программ позволяет описать ионно-ассистируемое осаждение, а также вычислить радиальное и глубинное распределение осажденных/имплантированных атомов. Результаты моделирования позволили сделать выводы о влиянии энергии ионного пучка, массы и флюенса ионов и, особенно, геометрии распыляемой мишени. Также представлены экспериментальные результаты по глубинным распределениям имплантированных атомов и толщинам нанесенных слоев.

### Введение

Ассистируемое ионным облучением осаждение (АИОО) слоев различных материалов (в англоязычной литературе: IBAD — ion beam assisted deposition) последние годы широко используется для модификации механических, электрических, оптических, трибологических, барьерных, коррозионных и каталитических свойств приповерхностных слоев [1-3].

Следует отметить, однако то, что широкое применение АИОО в ряде современных технологий (например, для улучшения эксплуатационных свойств металлических поверхностей) требует обеспечения процессов достаточно дорогостоящей и энергопотребляющей сложной техники, такой как ионный ускоритель плюс магнетронный, дуговой, ионно-плазменный или иной источник. Поэтому, целесообразным и актуальным, на наш взгляд, является поиск нетрадиционных оригинальных технических и конструктивных решений, позволяющих упростить и удешевить технологию, с сохранением основных достоинств процесса АИОО.

### Конструктивные особенности системы для АИОО и моделирование процессов осаждения слоев

Для модификации поверхностей металлов (в частности, меди с точки зрения приложений в технике электрических переключающих устройств) и иных материалов предложена новая оригинальная процедура с помощью метода АИОО, в рамках которой *in situ* реализуется имплантация ионов (например азота) и напыление металла (например золота, никели и др.) тем же ионным пучком [4]. Мишень для распыления в виде усеченного конического объекта из требуемого материала или из любого материала с нанесенным слоем требуемого материала является основным конструктивным узлом. Диафрагма в верхней части конического устройства, по диаметру совпадает с диаметром подложки (образца), служит для обеспечения одного из возможных режимов: ионно-ассистируемого осаждения (без диафрагмы), нанесения слоя (с диафрагмой) или циклического (повторяющегося) нанесения с

последующим АИОО и ионно-лучевым перемещением слоев. Таким образом при открытии диафрагмы центральная часть пучка воздействует только на поверхность образца, в то время как периферийная часть его служит для распыления стенки конуса. Определенная часть распыленных частиц достигает поверхности образца, т.е. в процессе ионного облучения усеченного конуса мы имеем дело с одновременными процессами ионной имплантации, распыления и осаждения атомов стенки конуса.

### Результаты

Эффективность обсуждаемого способа нанесения покрытий и модификации их ионным облучением зависит от материала конической мишени, геометрии конуса, наличие диафрагмы, сорта и энергии ионов, температуры образца. Процесс моделирования ассистируемого нанесения слоя на поверхность подложки нами был разделен на три относительно независимые задачи:

а) Моделирование пространственного распределения потока распыленных частиц, как функции азимутального и полярного угла (из-за наклонного падения ионного пучка на распыляемую мишень) [5];

б) Вычисление радиального распределения потока распыленных частиц, которые достигают поверхности подложки в единицу времени (оригинальной программы, разработанной нами) [4,6];

в) Моделирование процесса ионно-ассистируемого осаждения с учетом таких процессов как: распыление самой подложки с наносимым слоем, диффузия примеси, движение границы поверхности за счет нанесения и распыления (скорость осаждения вычисляется из двух первых ступеней процедуры) [7,8].

Для обеспечения эффективности процедуры моделирования поверхность распыляемой мишени (конуса) и образца делится на систему колец одинаковой площади для того, чтобы получить равные флюенсы на каждое кольцо. Затем пространственное распределение распыляемых ионным пучком частиц обрабатывается и анализируется с целью получения числа распыленных частиц, упавших на каждое рассматриваемое кольцо образца, в частности, и полное радиальное рас-

пределение осажденных атомов, в общем случае (см. рис. 1).

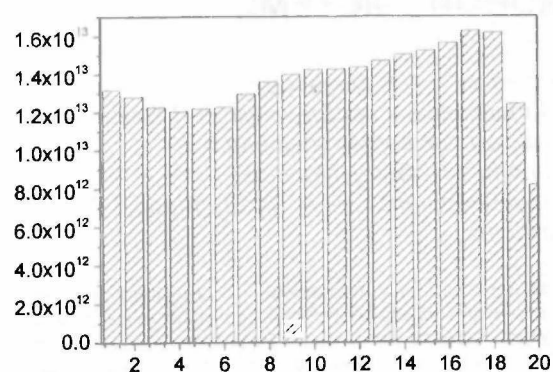


Рис. 1. Радиальное распределение осажденных на образец атомов Ag за 1 секунду как функция номера кольца (последний индекс соответствует самому внешнему кольцу). Условия ионной бомбардировки конической системы (покрытой серебром) ионами  $Ag^+$ :  $E=70$  кэВ,  $D=3 \times 10^{17}$   $Ag^+/cm^2$ , угол наклона ребра усеченного конуса  $\theta=15^\circ$

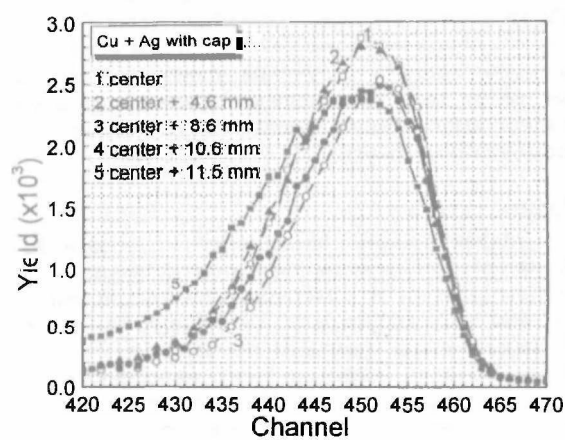


Рис. 2. Спектр RBS снятый в 5 точках вдоль радиуса мишени

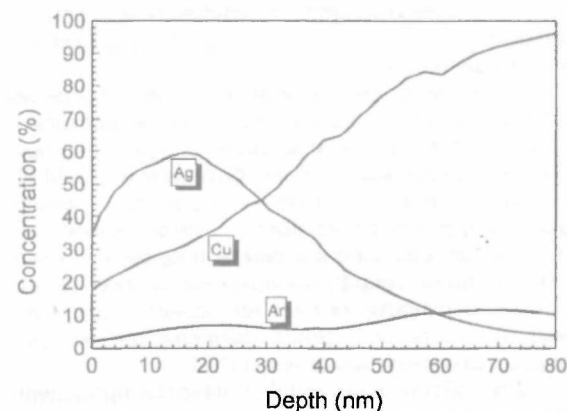


Рис. 3. Профили глубинных распределений атомов Cu, Ag и Ar в меди, полученные из спектров RBS для случая облучения конической серебряной системы ионами  $Ag^+$  с  $E=70$  кэВ,  $D=3 \times 10^{17}$   $Ag^+/cm^2$ ,  $J=8.5$   $\mu A/cm^2$

На рис. 2 представлены спектры RBS, снятые в 5 точках вдоль радиуса мишени ( $r=12$  мм). На рис. 3 представлены концентрационные профили глу-

бинных распределений атомов Cu, Ag и Ar в меди, полученные из спектров RBS (спектр снят в центре мишени). Из рис. 3 видим аномально глубокое проникновение атомов серебра в медную мишень — до 80 нм. Оценка возможных глубин проникновения их как атомов отдачи, в следствии бомбардировки осажденной серебряной пленки атомами  $Ag^+$  с  $E=70$  кэВ, не превышает — 25 нм ( $2R_p$ ). Это следует из того, что максимальная энергия полученная атомом серебра в лобовом столкновении

$$E_{Ag} = \lambda E_{Ar^+} = \frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2} E_{Ar^+} = 55 \text{ кэВ},$$

а проективный пробег для атомов Ag с энергией  $E=55$  кэВ в меди не превышает 12.5 нм [9]. Аномально глубокое проникновение атомов серебра в медную мишень в значительной мере можно объяснить фактором быстрой радиационно-стимулированной диффузии.

Процесс моделирования на основе созданного программного комплекса позволяет получать информацию о радиальном и глубинном распределении осажденных/внедренных атомов как функции типа ионов и их энергии, флюенса и геометрии распыляемой конической поверхности.

Для упрощения картины привязку теории к эксперименту выполним по интегральной толщине осажденного слоя  $d$  (ат./ $cm^2$ ). Рис. 4 иллюстрирует количество осажденных атомов серебра на единицу площади подложки, при облучении ионами  $Ag^+$  с энергией 70 кэВ при открытой диафрагме, как функции расстояния от оси образца. В целом соответствие результатов моделирования с экспериментом можно считать удовлетворительным. В случае сильного проявления радиационно-ускоренной диффузии осаждаемой примеси это соответствие может ухудшаться, так как отсутствуют точные данные для коэффициента диффузии при различных режимах ионного облучения.

Отличие экспериментальных значений  $d$  по сравнению с результатами моделирования, для периферийной от центра части мишени, может быть обусловлено такими факторами, как шероховатость поверхности распыляемого конуса, а также плохой осевой симметрии (на глаз было видно, что в одной части образца медь просвечивает, то есть серебра мало). В свою очередь при моделировании не учтено изменение энергии связи поверхностных атомов по мере ионного облучения стенки конуса, за счет накопления внедряемых атомов в ней. Моделирование выполняется для случая идеально гладкой поверхности конуса, а энергия связи поверхностных атомов  $U_0$ , используемая в программе SATVAL [4], выбирается величиной постоянной для данного типа материала.

Следует отметить, что приведенные экспериментальные данные по толщине осаждаемого слоя  $d$ , глубинного распределения примеси, а также результаты не вошедшие в данные материалы [4], свидетельствуют об удовлетворительной воспроизводимости этих величин от эксперимента к эксперименту.

В случае экспериментов на конусе с весьма гладкой поверхностью, полученной электролитическим осаждением золота, наблюдается лучшее соответствие результатам моделирования [4]. Как и при нормальном падении ионов на мишень [3] наблюдается достаточно сильная зависимость коэффициента распыления мишени от энергии ионов. Однако, в нашем случае на суммарный эффект накладывается еще и энергетическая зависимость углового (пространственного) распределения частиц. В общем случае оптимальные энергии ионов для нанесения более толстых слоев сдвигаются в район более низких энергий, чем характерный случаю нормального падения частиц.

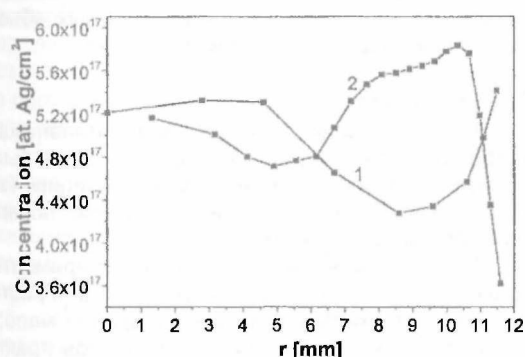


Рис. 4. Изменение количества осажденных атомов Ag как функция расстояния от оси образца. Условия ионной бомбардировки конической серебряной системы ионами аргона:  $E=70$  кэВ,  $D=3 \times 10^{17}$   $\text{Ag}^+/\text{cm}^2$ ,  $J=8.5$   $\text{мкА}/\text{см}^2$ , угол наклона ребра усеченного конуса  $\theta=15^\circ$ . 1— экспериментальные данные (RBS), 2— расчетные данные полученные на основании программы SDI [4,6]

#### Заключение

Предложена оригинальная система для реализации *in situ* процессов ионной имплантации и

нанесения слоев металлов одним и тем же пучком ионов. Создан программный комплекс, обеспечивающий описание процесса ионно-ассистированного осаждения слоев в такой системе, а также вычисление радиального и глубинного распределений осажденных/имплантированных атомов. Эти программы могут быть использованы и для описания процедуры нанесения покрытий на внутреннюю стенку трубок с использованием конической распыляемой мишени. Наблюдается удовлетворительное согласие теоретических результатов с экспериментальными.

Авторы благодарят П. Жуковского и Ч. Карвата за проведение имплантации в эксперименте.

#### Список литературы

1. *Ensinger W.* // Surface and Coat. Technol. -1996. - V. 84. - P.363.
2. *Komarov F.F., Komarov A.F., Mironov A.M.* // Nucl. Instr. and Meth. -1996. - V. B115. - P.505.
3. *Комаров Ф.Ф., Комаров А.Ф.* Физические процессы при ионной имплантации в твердые тела.— Минск: УП "Технопринт", 2001.— 393 с.
4. *Komarov F.F., Kamarou A.A., Zukowski P., Karwat Cz., Sielanko J., Cz.M. Kozak, Kiszczak K.* // Vacuum. - 2003. - V. 70. - P.215.
5. *Sielanko J., Szysko W.* // Nucl. Instr. and Meth. - 1986. - V. B16. - P.340.
6. *Kamarou A.A., Komarov A.F., Pil'ko V.V., Emel'yanov V.A., Zukowski P., Karwat Cz., Kozak M., Kiszczak K.* // Proc. of the Fourth Intern. Conf. IRS-2001. - Mn., 2001. - P.344.
7. *Комаров Ф.Ф., Комаров А.Ф., Миронов А.М.* // Поверхность. - 1997.- №6. -С.68.
8. *Komarov A.F., Komarov F.F., Zukowski P., Karwat Cz., Kamarou A.A.* // Vacuum. - 2001. - V. 63. - No 4. - P.495.
9. *Ziegler J.F., Biersack J. P., Littmark U.* The stopping and range of ions in solids. New York: Pergamon Press, 1985.

### PROCESSES OF ION BEAM ASSISTED DEPOSITION OF METAL LAYERS BY ONE BEAM SYSTEM

Fadey Komarov<sup>1)</sup>, Alexander Komarov<sup>1)</sup>, Pawel Zhukovski<sup>2)</sup>, Andrey Kamarou<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems, Minsk, 220064 Belarus e-mail: komarovF@bsu.by

<sup>2)</sup>Lublin University of Technology, Lublin, Poland

<sup>3)</sup>institute of Solid-State Physic, Schiller University of Jena, D-07743 Jena, Germany e-mail: kamarou@physse.nlw.uni-jena.de

An original approach and a one beam experimental setup for *in situ* ion implantation combined with the deposition of various materials on metals are suggested. A simulation system developed makes it possible to characterize ion-assisted deposition, as well as to analyze the radial and depth distribution of atoms deposited and implanted. Results of simulation allow us to conclude that the ion beam energy, the mass and fluence of the ions, and especially the target geometry have a noticeable effect on the processes. Experimental data for the depth profiles of atoms implanted and for the thickness of films applied are also reported. The variation of the film thickness, the uniformity of the films, and the efficiency of mixing in the film-substrate system are discussed based on the results of simulation and experimental data.