

УДК 621.039

ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ПОВЫШЕННОЙ АДГЕЗИЕЙ

В. И. Волосов, А. Г. Стешов, И. Н. Чуркин

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Представлены результаты исследований по улучшению адгезии тонких металлических пленок с помощью источника с регулируемым полиэнергетическим атомарным потоком. Приведены результаты обработки образцов атомарным потоком с различными параметрами.

В настоящее время для нанесения тонких пленок широко используются методы магнетронного распыления, вакуумного испарения и др. Для ряда приложений адгезии пленок, получаемых этими методами, недостаточно. Улучшение адгезии пленки к подложке достигается за счет формирования между ними переходного слоя. Чаще всего формирование переходного слоя осуществляется путем обработки поверхности образца ускоренными ионами. Для этого в дополнение к устройствам по напылению пленки используются ионные источники с энергией ионов в десятки-сотни килоэлектрон-вольт.

В ИЯФ СО РАН ведутся исследования по нанесению тонких металлических пленок с помощью импульсного плазменного источника полиэнергетических атомарных потоков (ИСП) [1]. Источник формирует поток атомов любых металлов (проводящих материалов) с широким энергетическим спектром от долей электрон-вольт до нескольких килоэлектрон-вольт. Это позволяет, используя один источник (работающий в различных режимах), наносить пленку и формировать переходный слой.

Ниже показана возможность формирования полиэнергетическим атомарным потоком переходных слоев с различными характеристиками (шириной, концентрацией имплантированных атомов), представлены результаты анализов поверхности обработанных образцов с помощью вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС) и резерфордовского обратного рассеяния (РОР).

Описание экспериментальной установки

Источник создан на основе плазменной ловушки со скрещенными радиальным электрическим и аксиальным магнитным полями, в которой горит самоподдерживающийся разряд с ионами металла или углерода [1]. В ловушке центральный стержневой электрод является катодом, а внешний цилиндрический электрод — анодом. Диаметр анода 300 мм, диаметр катода может меняться в зависимости от режима работы от 10 до 60 мм. Аксиальное магнитное поле пробочной конфигурации создается соленоидальными катушками. Радиальное электрическое поле вводится в плазму с помощью цилиндрических торцевых электродов специальной конструкции.

Основной компонентой плазмы являются ионы, образованные из материала катода в результате его распыления в разряде и последующей ионизации распыленных атомов в плазме. Катодом может быть любой проводящий материал, на источнике проводились эксперименты с Ti, Cu, Mo, W, C, Al, Ni, Nb, Ta. Для инициирования металлического разряда в источник подается некоторое количество газа (водород, азот, аргон), в результате чего зажигается газовый разряд в скрещенных полях, затем переходящий в металлический, при котором основной компонентой плазмы становятся замагниченные ионы материала катода. Источник работает в квазистационарном режиме с длительностью импульсов до 100 мс, напряжение на плазме разряда от 500 В до 5 кВ в зависимости от режима работы.

Источник генерирует веерные полиэнергетические атомарные потоки, выходящие в радиальном направлении. В центральной части источника расположены по азимуту выпускные каналы 85x45 мм, в которых размещаются обрабатываемые образцы. Использование самоподдерживающегося разряда с ионами металла обеспечивает возможность получения потоков атомов любых металлов, в том числе и тугоплавких. Схема формирования атомарных потоков приведена на рис. 1.

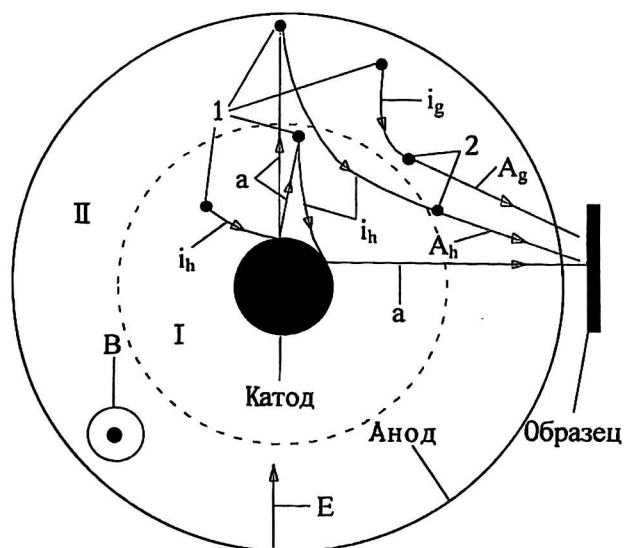


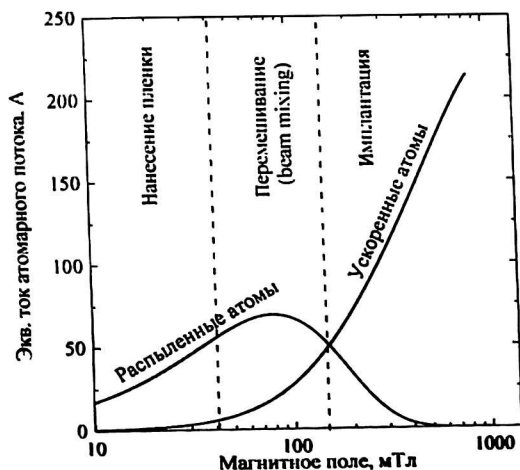
Рис. 1. Формирование многокомпонентных атомарных потоков в источнике:

- E — радиальное электрическое поле;
- B — аксиальное магнитное поле;
- i_h — ионы металла; i_g — ионы газа;
- A_h — ускоренные атомы металла;
- a — распыленные атомы металла;
- A_g — ускоренные атомы газа;
- 1 — ионизация атомов;
- 2 — перезарядка ускоренных ионов

Тяжелые ионы, рожденные в прикатодной области I, падают обратно на катод, интенсивно его распыляя (эффект самораспыления, обеспечивающий само-

поддержание разряда). Ионы, рожденные в области II, замагничиваются и, двигаясь по циклоидальной траектории, ускоряются в радиальном электрическом поле. Перезарядившись, ускоренные ионы выходят из источника вдоль хорд в виде ускоренных нейтральных атомов, создавая веерный поток. Энергетический спектр быстрых тяжелых атомов достаточно широкий, что объясняется тем, что перезарядка происходит в различных точках траектории иона, максимум спектра определяется напряжением на плазме разряда. В виде веерного потока из источника также выходят незаионизовавшиеся в плазме распыленные атомы и атомы иницирующего разряд газа. Таким образом, источник формирует многокомпонентный полиэнергетический атомарный поток, состоящий из атомов материала катода с энергией распыления от долей до десятков электрон-вольт, ускоренных атомов материала катода с энергией до нескольких килоэлектрон-вольт и ускоренных атомов газа с энергией доли — единицы килоэлектрон-вольт. Относительное количество ускоренных и распыленных атомов в потоке может регулироваться изменением режима работы источника. Качественная зависимость содержания в потоке ускоренных и распыленных атомов от магнитного поля приведена на рис. 2.

Рис. 2. Зависимость содержания в потоке ускоренных и распыленных атомов от величины магнитного поля



Интенсивность потока ускоренных атомов газа зависит в первую очередь от величины магнитного поля. Например, при небольших полях (0,06 Тс) содержание ускоренных атомов водорода значительно превышает поток ускоренных атомов титана (материал катода), а при поле 0,25 Тс — содержание атомов водорода составляет всего 3 % в атомарном потоке.

Формирование переходных слоев и исследование их характеристик

Как известно, адгезия пленки к подложке зависит от наличия и характеристик переходного слоя между материалом пленки и материалом подложки. Основными параметрами этого переходного слоя являются ширина и процентное содержание в нем атомов материала пленки. В наиболее распространенных методах нанесения пленочных покрытий, таких как дуговое испарение или магнетронное распыление, энергия напыляемых частиц не превышает единиц — десятков электрон-вольт. Для проникновения частиц в материал подложки на заметную глубину необходима энергия больше 0,5 кэВ. Поэтому при использовании этих методов атомы материала пленки не проникают внутрь подложки. В последнее десятилетие было разработано несколько методов, позволяющих

получать пленки с хорошей адгезией, наиболее известные это Ion beam assisted deposition (IBAD) [2], Beam Mixing Technology [2] и Plasma immersion ion implantation and deposition (PIIID) [3]. Общий принцип получения переходного слоя этими методами заключается в одновременной или последовательной обработке поверхности подложки потоками низкоэнергичных частиц (распыленных или испаренных) и пучками ускоренных ионов с энергиями до десятков килоэлектрон-вольт. В большинстве случаев эти два вида потоков создаются отдельными источниками, с разными системами питания.

Целью экспериментов, проводившихся на источнике, было изучение возможности формирования переходных слоев с различными характеристиками (ширина, концентрация атомов примеси) совместно с формированием тонких пленок одним источником, в одном вакуумном цикле. Формирование переходного слоя в наших экспериментах осуществлялось потоком ускоренных атомов, что имеет значительные преимущества перед стандартно-используемыми ионными системами. Обычно ток пучка ионного источника ограничивается эффектами объемного заряда, особенно в случае использования ионов металлов. Использование ускоренных потоков атомов снимает эту проблему и позволяет получать интенсивность потока до 100 экв.мА/см² даже для больших масс. Кроме этого, при обработке диэлектрических материалов использование атомарных потоков решает проблему поверхностного заряда.

Хотя энергия ускоренных атомов в большинстве случаев относительно невысока — порядка нескольких килоэлектрон-вольт (традиционные энергии имплантации более 10 кэВ), как показали исследования [4], высокая интенсивность потока увеличивает глубину имплантации по сравнению с классической длиной проективного пробега. Это происходит за счет диффузионных эффектов, возникающих при высоких интенсивностях облучения [5]. Так, при обработке титановой подложки потоком ускоренных атомов углерода с энергией до 2,5 кэВ глубина имплантации была 3,5 мкм, хотя теоретически длина проективного пробега при такой энергии 7 нм (анализ образцов проводился на станции СИ ИЯФ). Этот эффект подтверждается и результатами анализа образца кремния, обработанного атомами меди со средней энергией 3 кэВ и интенсивностью ~ 50 экв.мА/см², глубина имплантации 140 нм значительно превышает проективный пробег (~ 10 нм).

Таким образом, атомарные потоки с энергией до нескольких килоэлектрон-вольт позволяют создавать переходные слои между пленкой и подложкой толщиной десятые доли — единицы микрометров. Изменяя магнитное поле, можно получать различные интенсивности и средние энергии потока ускоренных атомов, например как это показано на рис. 3, это позволяет регулировать как толщину переходного слоя, так и концентрацию содержания в нем атомов материала пленки.

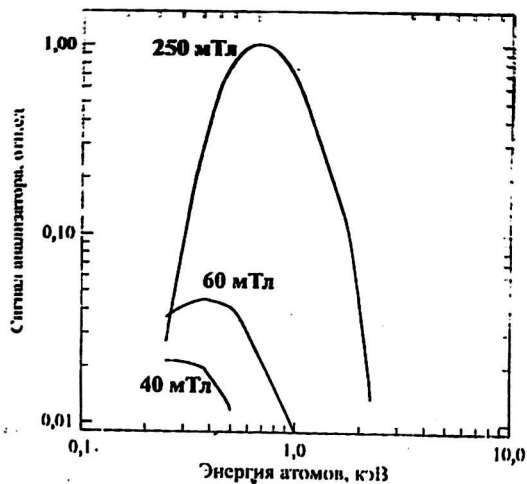


Рис. 3. Энергетические спектры атомов титана при различных магнитных полях

Концентрация атомов пленки в переходном слое может легко регулироваться временем обработки подложки. На рис. 4 показана зависимость концентрации атомов меди в переходном слое от времени обработки кремниевой подложки (числа импульсов источника). Более длительная обработка поверхности подложки (десятки эквивалентных секунд) приведет к образованию тонкой пленки на поверхности образца, которая будет связана с подложкой непрерывным переходным слоем. Процесс нанесения пленки можно ускорить, перейдя в область более низких магнитных полей (см. рис. 2, 3), где интенсивность потока ускоренных атомов и их энергия падают, коэффициент распыления поверхности понижается и скорость роста пленки увеличивается. В этом случае разряд в источнике приближается к стандартному магнетронному разряду. При обработке образцов кремния ускоренными атомами меди при различных магнитных полях в источнике толщина переходного слоя существенно меняется. На рис. 5 представлены профили примеси атомов меди в кремниевой подложке при различных магнитных полях: кривая 1 — магнитное поле 0,6 Тл, средняя энергия атомов 3 кэВ, интенсивность ~ 50 экв.мА/см²; кривая 2 — магнитное поле 0,25 Тл, средняя энергия атомов 2,5 кэВ, интенсивность ~ 35 экв.мА/см²; кривая 3 — магнитное поле 0,16 Тл, средняя энергия 2 кэВ, интенсивность ~ 15 экв.мА/см². Видно, что увеличение интенсивности атомарного потока и рост средней энергии атомов при росте магнитного поля приводят к увеличению толщины переходного слоя почти в два раза (кривые 1, 3).

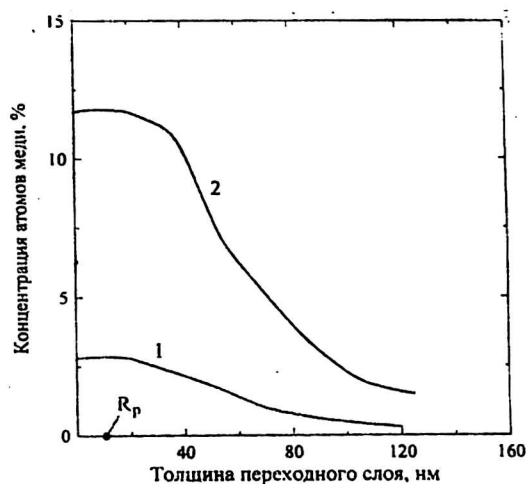


Рис. 4. Зависимость концентрации атомов меди в переходном слое от времени обработки кремниевой подложки: 1 — один импульс источника длительностью 2 мс; 2 — десять импульсов (магнитное поле 0,6 Тл, средняя энергия ~ 3 кэВ, интенсивность ~ 50 экв.мА/см²), R_p — длина проактивного пробега иона меди с энергией ~ 3 кэВ

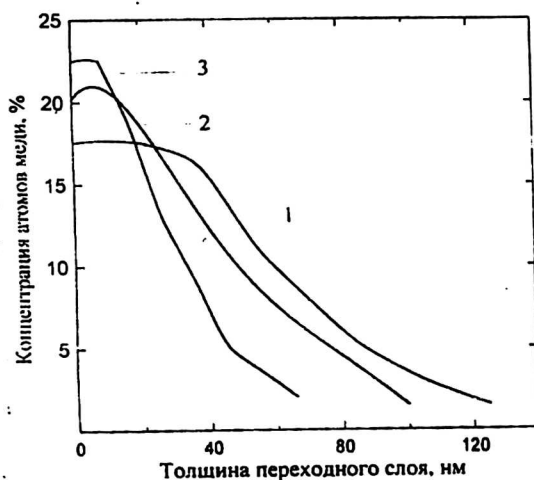


Рис. 5. Концентрация атомов меди в зависимости от магнитного поля в источнике

Заключение

Источник полиэнергетических атомарных потоков (ИСП) позволяет осуществить напыление тонких пленок одновременно с формированием переходного слоя в материале подложки, который состоит из атомов материала напыляемой пленки. Это дает возможность получать высокие адгезионные свойства этих пленок. Изучены условия формирования переходного слоя, зависимость основ-

ных параметров этого слоя (толщина слоя, процентное содержание атомов материала пленки) от параметров разряда в источнике (напряжения на разряде, напряженности магнитного поля). В перспективе предполагается переход с импульсного на стационарный режим работы, что позволит увеличить скорость обработки и улучшить толщину получаемых покрытий.

Литература

1. Churkin I. N., Volosov V. I., Steshov A. G. Review of Scientific Instruments, 1998. № 69, is. 2., P. 856—858.
2. Kohlfhof K.//Nuclear Instruments and Methods. 1995. B. 106. P. 662—669.
3. Anders A.//Surface & Coatings Technology. 1997. № 93. P. 158—167.
4. Volosov V. I., Tolochko B. P., Churkin I. N.//Nuclear Instruments and Methods. 1998. A. 405. P. 463—465.
5. Гусева М. И.//Итоги науки и техники. Физические основы лазерной и пучковой технологии. — М.: ВИНТИ. 1989. № 5. С. 5—54.

DEPOSITION OF THIN METAL FILMS WITH IMPROVED ADHESION

V. I. Volosov, A. G. Steshov, I. N. Churkin

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The investigations of the improving of thin metal films adhesion by the source of polyenergetic atomic fluxes are presented. The experimental results of samples treatment by polyenergetic atomic fluxes at various parameters are discussed.