

УДК 539.23

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОПЛЕНОК МЕТАЛЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

К. ф.-м. н. Е. Л. Жавжаров, д. ф.-м. н. В. М. Матюшин, А. А. Рябченко

Запорожский национальный технический университет  
Украина, г. Запорожье  
jin@zntu.edu.ua

*Приведены результаты экспериментального исследования процесса получения тонких металлических пленок Ag, Cu, Au в среде атомарного водорода. Предложено два метода, позволяющих контролируемо получать пленки металлов толщиной 1–20 нм при вакууме в камере порядка 20 Па. В основе этих методов лежит процесс распыления атомов поверхности твердого тела, возникающий под действием энергии рекомбинации атомарного водорода в молекулярный.*

*Ключевые слова: нанопленки Ag, Cu, Au, атомарный водород, рекомбинация, распыление.*

Электрофизические свойства и широкий спектр эффектов, которые имеют место только в тонких металлических пленках, обуславливают не только их практическое использование в многих устройствах современной микро- и нанoeлектроники, оптоэлектроники, техники СВЧ, но и позволяют получать ценную информацию, которая дает возможность решать фундаментальные проблемы физики поверхности и твердого тела.

При выборе метода получения тонких пленок обращают особое внимание на такие характеристики процесса как воспроизводимость параметров, степень воздействия на поверхность подложки твердого тела, чистоту, экономичность. Большинство современных методов получения тонких пленок требуют довольно сложного оборудования, что связано с необходимостью получения высокого вакуума, проведением многостадийных процессов [1].

Альтернативным методом получения тонких металлических пленок может служить получение пленок металлов с участием атомарного водорода. При воздействии атомарного водорода на поверхность твердого тела протекает экзотермическая реакция рекомбинации атомов в молекулы (около 4,5 эВ/акт рекомбинации). Эта энергия может как возбуждать электронную подсистему твердого тела, так и стимулировать ряд физических процессов — локальный разогрев, распыление, перенос и диффузию поверхностных атомов [2].

Цель данной работы — выявить закономерности образования нанопленок металлов Cu, Ag, Au при воздействии атомарного водорода. Данные металлы широко применяются в микроэлектронике при создании проводящих слоев современных чипов.

Атомарный водород получали диссоциацией молекулярного водорода в плазме ВЧ-разряда, молекулярный водород — электролизом из раствора 20% КОН в дистиллированной воде. Далее водород пропускать через форбаллон для улавливания капель КОН, осушительную колонку, заполненную силикагелем, после чего он поступал в реакционную камеру. Концентрация Н в рабочем объеме измерялась колориметрическим методом и достигала около  $5 \cdot 10^{-14}$  см при давлении в камере 15–25 Па.

Толщина пленок контролировалась на рентгеновском микроанализаторе MAP-2, Оже-спектрометре LAS-2000, спектрофотометре СФ-16, а также путем измерения поверхностного сопротивления образцов ( $\rho_s$ ).

Образцы закреплялись на держателе, отдаленном примерно на 25 см от области разряда, что позволяло исключить попадание на образец радикалов гидроксила и других ионов, образующихся в водородной плазме. Температура образцов измерялась хромель-копелевой термопарой, закрепленной на их поверхности. При обработке в Н образцы нагревались только за счет энергии, выделяющейся при рекомбинации. В качестве материала подложки использовался монокристаллический германий (111) и ситаловые подложки СТ-51.

Был исследован процесс распыления металлических пленок толщиной 100 нм Cu, Ag, Au, полученных термическим испарением в вакууме. В процессе обработки атомарным водородом пленки активно распылялись. При этом скорость распыления зависела от концентрации атомарного водорода в газовой фазе, структуры пленок, давления в рабочей камере и условий теплоотвода от подложки.

Обработка образцов проводилась при максимально возможной в условиях эксперимента концентрации H (около  $5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^{-3}$ ) в течение различного времени (от 60 с до 60 мин) в зависимости от толщины пленок.

Выявлено, что в результате обработки в атомарном водороде металлические пленки активно распылялись — толщина пленок уменьшалась, а  $\rho_s$  образцов возрастало. Процесс воздействия продолжался вплоть до полного исчезновения пленок, при этом поверхностное сопротивление образцов приближалось к  $\rho_s$  исходной подложки.

Рассчитана скорость распыления пленок ( $V_p$ ): для Cu — примерно 0,7 нм/с, для Ag — 0,8 нм/с, для Au — 0,5 нм/с. Замечена корреляция между  $V_p$  и температурой плавления соответствующих металлов, а также между  $V_p$  и атомной массой соответствующих элементов.

Так как медь, серебро и золото не имеют летучих соединений с водородом, механизм распыления представляется чисто физическим — за счет передачи поверхностному атому энергии, достаточной для его отрыва от пленки, и импульса, направленного от поверхности образца в газовую фазу.

Также был исследован процесс массопереноса через газовую фазу. При этом чистая ситалловая подложка располагалась на некотором расстоянии от подложки с соответствующей пленкой и проводилась обработка в H. В процессе обработки атомы металла распылялись, переходили в газовую фазу и мигрировали от источника к ситалловой подложке. Сталкиваясь с поверхностью твердого тела, атомы металла переходили в локализованное состояние. В результате чего происходила конденсация и рост пленки данного металла на новом месте. Оценка скорости роста пленки показала скорость осаждения порядка 0,04 нм/с для пленок Cu, Ag. Для данного механизма нанесения пленки скорость осаждения оказывается значительно меньшей, что связано с конкурирующим процессом распыления уже осажденной пленки.

Обработка структур «металл — полупроводник» или «металл — диэлектрик» атомарным водородом может служить для образования нанопленок металлов при давлении в рабочей камере порядка 20 Па. Полученные пленки будут технологически чистыми, иметь хорошую адгезию. При использовании обработки атомарным водородом возможны два метода образования нанопленок. При первом методе пленка получается в результате постепенного уменьшения толщины за счет контролируемого распыления более толстой пленки, полученной стандартным способом. При втором методе нанопленка образуется при осаждении атомов металлов из газовой фазы в процессе распыления источника металла. Первый метод (механизм распыления) позволяет получать пленки толщиной от толщины исходной пленки до монослоя. Второй метод (механизм газофазного переноса) позволяет получать пленки толщиной от монослоя до примерно 10 нм.

Таким образом, рассмотренные методы получения нанопленок металлов позволяют создавать контролируемые по параметрам и толщине металлические пленки при использовании технологической операции обработки атомарным водородом.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Антоненко С. В. Технология тонких пленок: Учебное пособие.— Москва: МИФИ, 2008.
2. Матюшин В. М., Жавжаров С. Л. Радикалореконбінатійна обробка мікроструктур.— Запоріжжя: ЗНТУ, 2011.

---

E. L. Zhavzharov, V. M. Matyushin, A. A. Riabchenko

#### **Features of formation of metal nanofilms under the influence of atomic hydrogen.**

The paper presents the results of experimental studies of the process of producing thin metallic films of Ag, Cu, Au in the environment of atomic hydrogen. The two proposed methods allow obtaining films of controlled 1—20 nm thickness in a vacuum chamber of about 20 Pa. The basis of these methods is the process of sputtering of atoms of a solid surface caused by the energy of recombination of atomic hydrogen into molecular hydrogen.

Keywords: Ag, Cu, Au nanofilms, atomic hydrogen, recombination, sputtering.