

СЕКЦИЯ 2 НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК. МЕТОДИКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Исследование свойств медных пленок, полученных методом ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени

М.В. Макарова, К.М. Моисеев
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская д. 5, стр. 1
E-mail: m.v.makarova@list.ru

В статье исследованы характеристики поверхности пленок меди, осажденных методом ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени. Выявлены и описаны различные дефекты пленок и проведен рентгенофлуоресцентный анализ поверхности.

Study of the copper film properties deposited by magnetron sputtering in the target vapors. M.V. Makarova, K.M. Moiseev. The properties of copper films deposited by magnetron sputtering in target vapors were studied. Different types of the defects in the films were identified and described. The x-ray fluorescence analysis of the film surface was carried out.

Введение

На сегодняшний день толстые проводящие пленки меди применяются в таких перспективных областях, как термоэлектричество и силовая электроника. Основными изделиями являются термоэлектрические охладители, термоэлектрические генераторы энергии, силовые модули и др. Толщина проводящих слоев меди в этих изделиях должна составлять десятки, и даже сотни микрометров [1]. Однако в настоящее время существует ряд сложностей, связанных с применимостью методов формирования толстых проводящих слоев. Имеющиеся методы являются либо непроизводительными, и время формирования пленок может занимать часы и даже сутки, либо сложными с точки зрения реализации технологии и крайне дорогими [2, 3, 4]. Одним из наиболее перспективных PVD методов формирования толстых проводящих пленок является метод ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени, или иными словами, метод жидкофазного магнетронного распыления (ЖФМР). Данный метод отличается высокими скоростями осаждения, составляющими десятки мкм/мин. Благодаря возможности проведения процесса в глубоком вакууме без рабочего газа, пленки, полученные этим методом, обладают высокой чистотой. Также вследствие наличия ионизированной фазы покрытия обладают отличными показателями адгезии [5]. Использование этого метода на производстве, благодаря его особенностям, позволяет значительно сократить время формирования пленки с нескольких часов до нескольких минут, и, тем самым, увеличить производительность. Однако не менее важным аспектом является качество сформированного покрытия, которое должно удовлетворять требованиям, предъявляемым к проводящим покрытиям. В данной работе проведен ряд измерений для оценки параметров пленок меди, полученных этим методом.

Условия проведения экспериментов

Медные пленки осаждались на полированные подложки из AlN с шероховатостью Ra 7...9 нм и размерами 60x48 мм. Толщина подложек составляла 0,25 мм и 0,5 мм.

Осаждение пленок проводилось в вакуумной камере при остаточном давлении $P = 2 \cdot 10^{-3}$ Па. Мощность, подаваемая с блока питания, $P = 1,4$ кВт. Скорость осаждения была рассчитана по времени и измеренной толщине, и по результатам проведения 15-ти экспериментов составила $11,1 \pm 1,3$ мкм/мин.

Шероховатость поверхности

Параметр шероховатости Ra измерялся с помощью профилометра Mahr MarSurfPS1. Для сравнения приведены значения шероховатости пленки, полученной методом классического магнетронного распыления с помощью протяженного планарного магнетрона, длиной 400 мм при следующих параметрах процесса: $P = 2 \cdot 10^{-3}$ Па, $Q_{Ar} = 3,5$ л/ч, $P = 2,7$ кВт и регулировке по опорной мощности (таблица 1).

Таблица 1 – Значения шероховатости медных пленок

Метод осаждения Номер измерения	Жидкофазное магнетронное распыление, нм	Классическое магнетронное распыление, нм
1	57	27
2	68	31
3	91	28
4	98	26
5	91	29
Среднее значение, мкм	81 ± 23	28 ± 3

Шероховатость пленок полученных методом ЖФМР выше, чем шероховатость пленок, полученных методом классического магнетронного распыления.

Анализ качества поверхности

С помощью атомно-силового микроскопа Solver NEXT проведено сканирование поверхности медного покрытия полуконтактным методом (рис. 1).

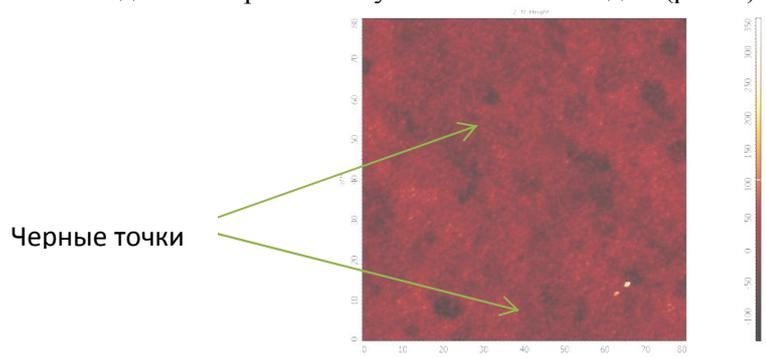


Рис. 1. Изображение поверхности медной пленки.

На изображении скана поверхности присутствуют черные точки. Сканирование зоны без черных точек представлено на рис. 2. Результат сканирования областей с черными точками представлен на рис 3.

Анализ участка поверхности меди с черными точками показал, что эти точки являются выступами. Размеры выступов составили: высота $\sim 1,7 \dots 2$ мкм, диаметр основания $\sim 11 \dots 17$ мкм. На поверхности также обнаружены темные пятна. Сканирование показало, что это углубления ~ 1 мкм (рис. 4).

Появление выступов можно связать с периодическим вылетом кластеров меди и их осаждением на поверхность подложки. Углубления же могут образовываться в ходе слишком быстрого и беспорядочного формирования медного покрытия.

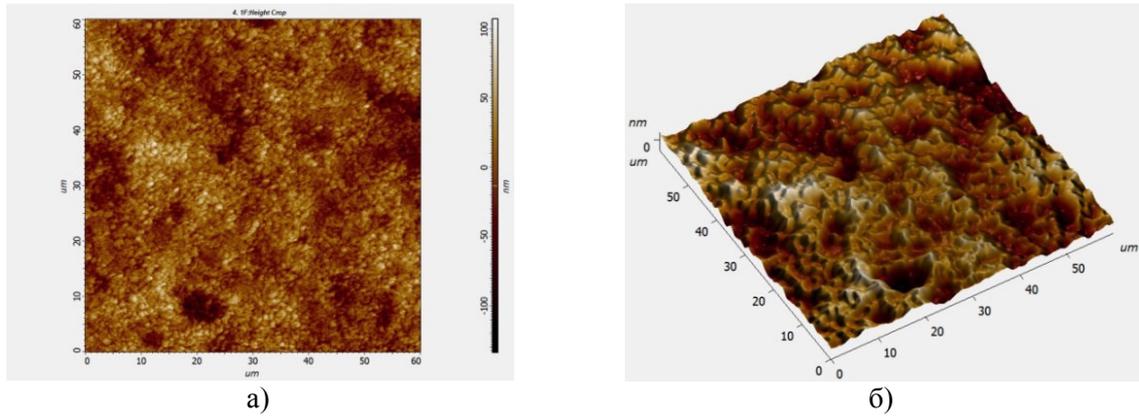


Рис. 2. Поверхность медной пленки: а) – 2D изображение поверхности без черных точек, б) – 3D изображение поверхности без черных точек

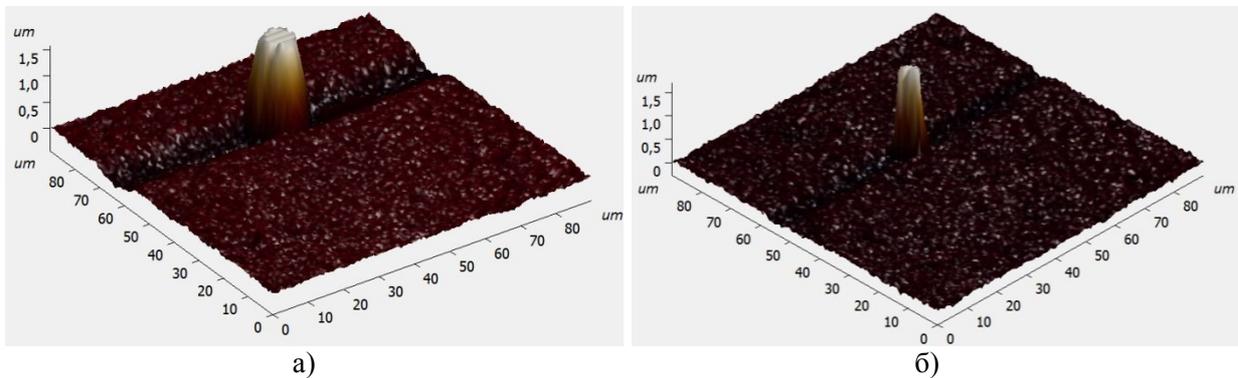


Рис. 3. Выступы на поверхности: а), б) – изображения зон черных точек из разных областей поверхности медной пленки.

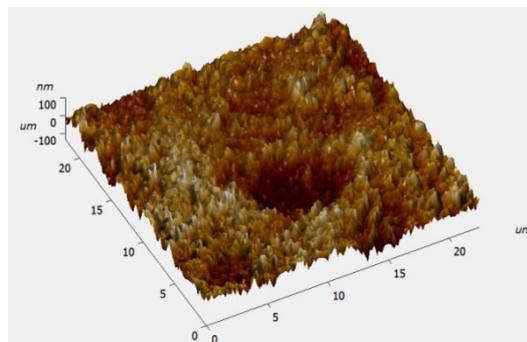


Рис. 4. Углубление в медной пленке.

С помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi SU1510 с рентгеновским микроанализатором ThermoScientific проведено сканирование поверхности пленки меди. Обнаружены дефекты в виде трещин и вкраплений (рис. 5). Размеры дефектов варьируются от 5 до 20 мкм. Дефекты типа трещин, также как и углубления, могут образовываться из-за очень быстрого и беспорядочного формирования пленки. Вкрапления могут быть обусловлены осаждением кластеров или микрокапель.

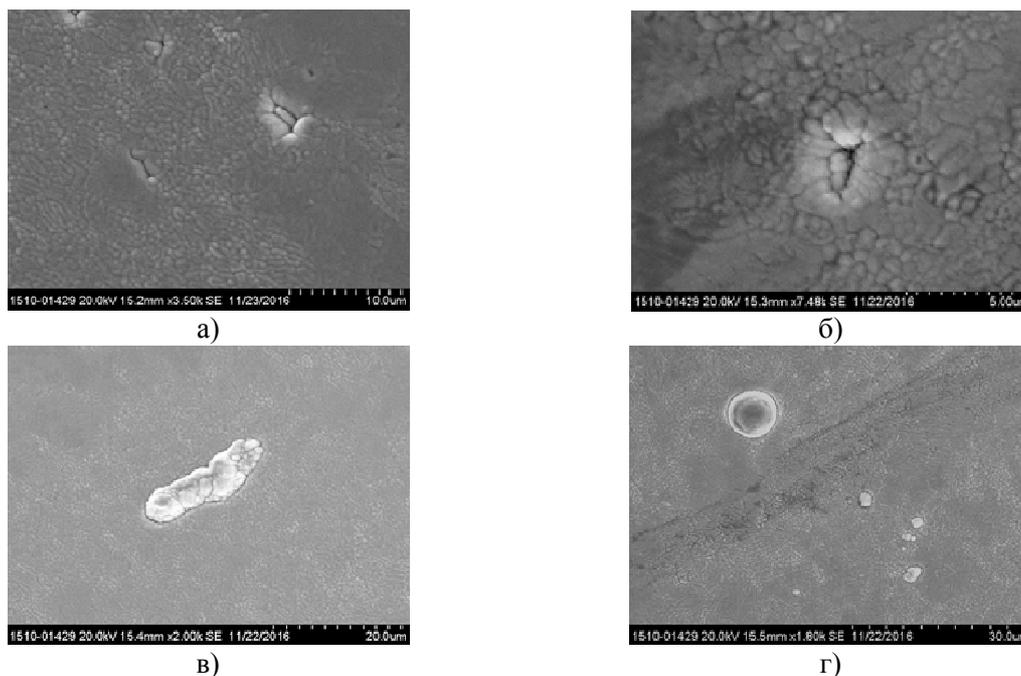


Рис. 5. Дефекты медного покрытия: а), б) – дефекты типа трещин, в), г) – дефекты типа вкраплений.

Рентгенофлуоресцентный анализ поверхности пленки меди

С помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi SU1510 с рентгеновским микроанализатором ThermoScientific проведен анализ поверхности на химический состав.

В ходе анализа обнаружено, что пленка на поверхности имеет зоны с материалом тигля, в нашем случае, молибдена (рис. 6).

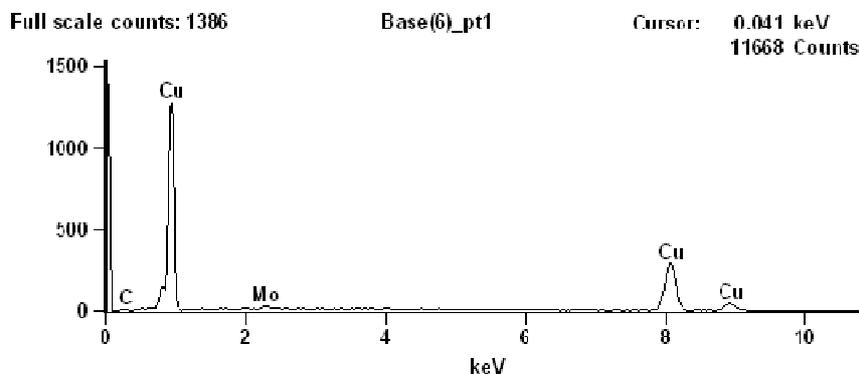


Рис. 6. Спектр материалов, обнаруженных на поверхности пленки.

Причина наличия молибдена на медной пленке – распыление материала тигля, когда на завершающей стадии процесса в зоне эрозии жидкой мишени магнетрона образуются локальные области, периодически не заполняющиеся медью. Из этих зон происходит распыление молибдена в среде паров меди, с последующим осаждением на поверхность пленки, формирующейся на подложке. Избежать этого можно только контролируя уровень меди в тигле, тем самым исключив возможность оголения зон тигля.

Обсуждение результатов

- 1) Скорость осаждения пленок методом ЖФМР является нестабильной величиной. Для мощности 1,4 кВт и давления $2 \cdot 10^{-3}$ Па скорость составила $11,1 \pm 1,3$ мкм/мин. Величина доверительного полуинтервала достаточно велика для точного контроля толщины осаждаемой пленки по времени, что является отрицательной особенностью метода;

- 2) Шероховатость пленки, осажденной методом ЖФМР, выше, чем шероховатость пленки, осажденной методом классического магнетронного распыления, и составляет 81 ± 23 нм. В изделиях силовой электроники и термоэлектрических элементах жестких требований к шероховатости проводящего слоя, как правило, не предъявляется, однако для других применений это может быть критично;
- 3) При сканировании поверхности на зондовом и электронном микроскопах установлено, что на пленке имеются выступы высотой ~ 2 мкм и диаметром ~ 17 мкм, а участки пленки без выступов имеют кратерообразные дефекты глубиной ~ 1 мкм. Кроме того, на поверхности пленок, осажденных методом ЖФМР, присутствуют дефекты с линейными размерами от 5 до 20 мкм двух видов: вкрапления и трещины. Данные дефекты могут оказывать отрицательное влияние при дальнейшем процессе химического нанесения финишного покрытия, вызывая неоднородности покрытия;
- 4) На поверхности медной пленки в ходе рентгенофлуоресцентного анализа выявлено наличие материала тигля – молибдена. Этот фактор можно отнести к отрицательным, так как наличие молибдена на поверхности меди вызывает технологические проблемы при формировании финишного покрытия.

Заключение

В результате проведенных исследований выявлены некоторые особенности медных пленок, получаемых методом ЖФМР. При выборе и использовании данного метода следует учитывать:

- Наличие поверхностных дефектов: трещин, вкраплений, выступов;
- Наличие на поверхности меди пленки материала тигля, для удаления которой необходимо химическое или плазменное травление;
- Отсутствие воспроизводимости скорости осаждения от процесса к процессу, что затрудняет контроль толщины получаемой пленки.

В том случае, если в медных пленках, используемых в изделии, допускаются описанные выше виды дефектов, метод ЖФМР является лучшим среди существующих по своим показателям для получения толстых медных пленок в силу своей производительности, относительно малой цены и простоты реализации.

Литература

1. И. Кокорева. Отечественная силовая электроника. Фирмы-производители. Электроника: НТБ. 2007. №3. С. 26-33.
2. Ю. Панфилов. Нанесение тонких пленок в вакууме. Технологии в электронной промышленности. 2007. №3. С. 76-80.
3. Л. Исламгазина, Ю. Шульц-Хардер, С. Валев. Критерии выбора подложек для силовых модулей. Компоненты и технологии. 2004. №3. С. 60-63.
4. А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.
5. М.В. Макарова, Д.Д. Васильев, К.М. Моисеев. Процесс ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени // Будущее машиностроения: сб. тр. 9-ой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов / Московский государственный университет имени Н.Э. Баумана. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016 – С. 298-305.