

## АСМ АНАЛИЗ НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЙ ЭЛЕКТРОКРИСТАЛИЗАЦИИ ПОКРЫТИЙ СЕРЕБРА НА ПОВЕРХНОСТЯХ КРЕМНИЯ

И. И. Мушовец<sup>1</sup>, В. М. Полевиков<sup>2</sup>, А. А. Хмыль<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

<sup>2</sup> Гомельский государственный университет им Ф. Скорины

Развитие микроэлектроники требует поиска новых путей и режимов формирования функциональных тонкопленочных систем, отличающихся повышенными эксплуатационными характеристиками. Одной из проблем является нанесение локальных металлических покрытий на диэлектрические и полупроводниковые подложки.

В работе представлены результаты анализа режимов получения локальных осадков серебра на подложках кремния, на которые предварительно наносился проводящий подслоя из ванадия. Проводящие подслоя наносились методом лазерного испарения в вакууме. Локальные осадки серебра были получены методом электрохимического осаждения при плотности тока  $0,5 \text{ А/дм}^2$ . Варьировалось время осаждения серебра из раствора ( $t$ ) и тип тока: постоянный (ПТ) и импульсный (ИТ). Кроме того, проводился сравнительный анализ покрытий полученных при наполнении осаждаемых слоев частицами ультрадисперсного алмаза (УДА).

Методология исследований направлена на сравнительную экспериментальную и теоретическую оценку структуры, топографии и эксплуатационных свойств тонких покрытий серебра в зависимости от токовых режимов электрохимического формирования. На основе результатов данного анализа проводилась оптимизация технологии получения рабочей поверхности покрытия на основе критерия высокой электропроводности, гладкости поверхности и однородности структуры, высокой адгезии и низкого сопротивления скольжению.

### Экспериментальный анализ

Начальные стадии роста покрытий обусловлены локальными процессами электрокристаллизации серебра на чужеродной подложке. Время локализации электрохимического осаждения серебра непосредственно у подложки ограничено. Однако, эта стадия важна, так как структура первоначально сформированных на чужеродной подложке кристаллов оказывает эпитаксиальное влияние на последующее осаждение покрытия [1].

Для регистрации начальных структур использовались возможности атомно-силовой микроскопии. Измерения проводились с помощью экспериментального комплекса НАНОТОП-202. На рис. 1. сравнивается характер поверхности, полученной при постоянном токе для различных времен осаждения: 2; 5; 12 и 120 с. Возникновение отдельных разрозненных кристаллитов на поверхности происходит лишь в течение первых 2 секунд процесса осаждения (рис. 1а). В процессе дальнейшего электролиза наблюдается появление кристаллитов вблизи первоначальных центров. Также происходит рост ранее появившихся кристаллитов и их слияние в более крупные образования (кластеры) (рис. 1б). Зародыши однородные по размеру (латеральный размер около 800 нм) и кристаллы растут по механизму двойникования. После полного заполнения подложки формируются более крупные кластеры (латеральный размер 1,5–2 мкм) (рис. 1в), размер которых при последующем увеличении времени электролиза мало изменяется (рис. 1г). Шероховатость поверхности увеличивается с ростом толщины осадка.

Использование импульсных режимов увеличивает количество зародышей повышается равномерность их распределения по поверхности катода (рис. 2). Рост кластеров в случае ИТ происходит медленнее. Сплошность покрытия достигается увеличением плотности расположения кластеров. При изменении рабочей частоты от 1 до 100 Гц происходит измельчение структуры. В целом импульсные режимы позволяют формировать более гладкие поверхности.

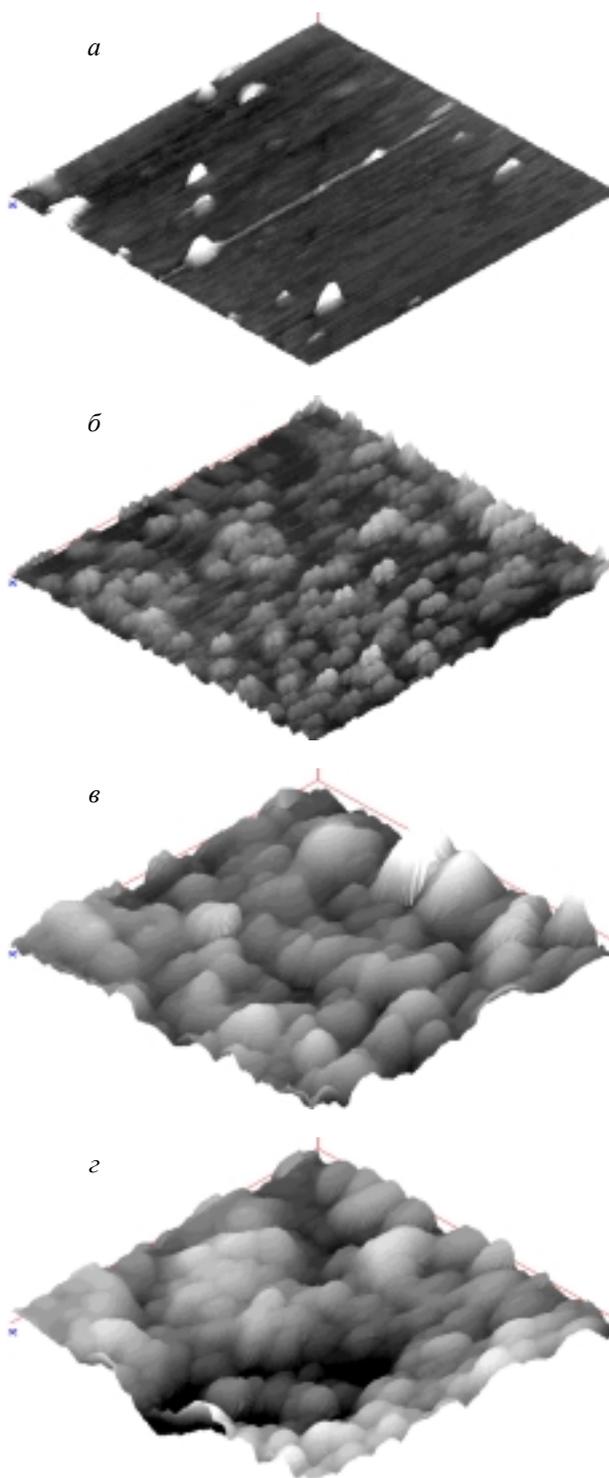


Рис. 1. АСМ-изображения топографии покрытия серебра, полученного электролизом при постоянном токе: *а* – время осаждения 2 с (амплитуда высот  $A = 178$  нм, среднеквадратическое отклонение высоты  $\sigma = 10,2$  нм); *б* – 5 с ( $A = 157$  нм,  $\sigma = 22,7$  нм); *в* – 12 с ( $A = 1145$  нм,  $\sigma = 140,7$  нм); *г* – 120 с ( $A = 1299$  нм,  $\sigma = 183,2$  нм). Поле сканирования  $14,5 \times 14,5$  мкм

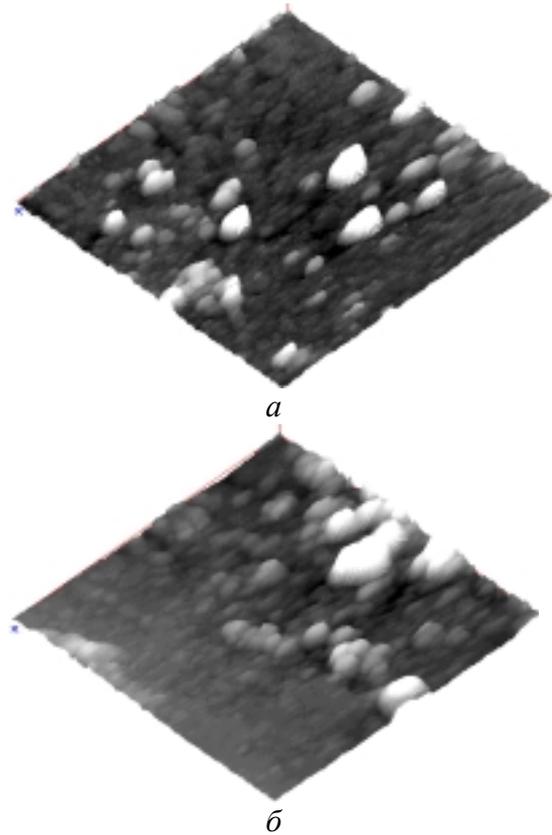


Рис. 2. АСМ-изображения топографии покрытия серебра, полученного электролизом при импульсном токе: *а* – время осаждения 2 с ( $A = 380$  нм,  $\sigma = 33,1$  нм); *б* – 12 с ( $A = 328$  нм,  $\sigma = 36,6$  нм). Поле сканирования  $14,5 \times 14,5$  мкм

Введение в состав электролита УДА способствует уменьшению размера зародышей покрытия и увеличению их количества на подложке. Можно отметить тенденцию округления кристаллитов. При использовании периодических токов формируются более гладкие слои. При использовании импульсных токов шероховатость покрытий серебро – УДА снижается с увеличением частоты. На реверсивном токе проявляются отчетливые грани роста. При этом отмечается высокая плотность заполнения подложки кристаллитами покрытия.

#### Оптимизация режимов формирования покрытий

В качестве оптимизационных параметров рассматривались электрическое контактное сопротивление сформированной поверхности, а также параметры характеризующие трение исследуемой поверхности [2].

Наряду с фактической площадью контакта,

сила трения характеризовалась суммой площадок на боковых поверхностях выступов, оказывающих деформационное противодействие скольжению, которые определялись в результате соответствующего компьютерного анализа АСМ – изображений рельефа. Для этого производится выделение граней со стороны скольжения исследуемой поверхности и выполняется построение и анализ соответствующей опорной кривой, характеризующей распределение суммарной площади граней оказывающих сопротивление при скольжении в зависимости от интенсивности их воздействия. В таблице приведены номера режимов создания покрытий, для которых осуществлялся оптимизационный анализ.

Результаты оптимизации представлены на диаграммах рис. 3, на которых приведены расчетные значения для удельной фактической площади контакта (в процентах от номинальной площади контакта), удельной площади рабочих граней рельефа в скользящем контакте (в процентах от номинальной площади контакта), удельной проводимости электрического контакта (отнесена к удельной проводимости серебра).

#### Режимы создания покрытий

Покрyтия без наполнения УДА			
t,c	2	12	120
ПТ	1	2	3
ИТ	4	5	6
Покрyтия с наполнением УДА			
t,c	2	12	120
ПТ	7	8	9
ИТ	10	11	12

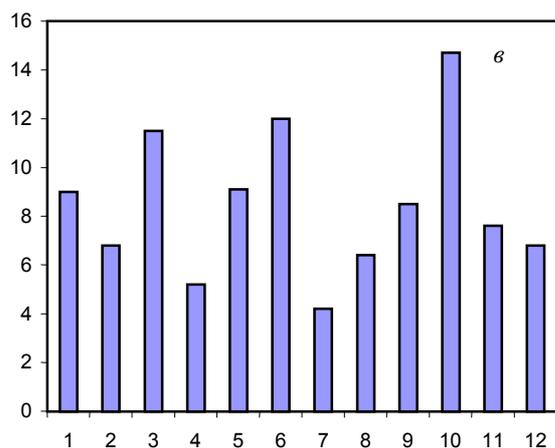
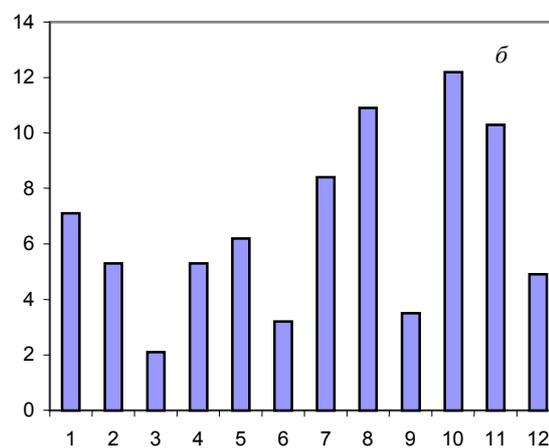
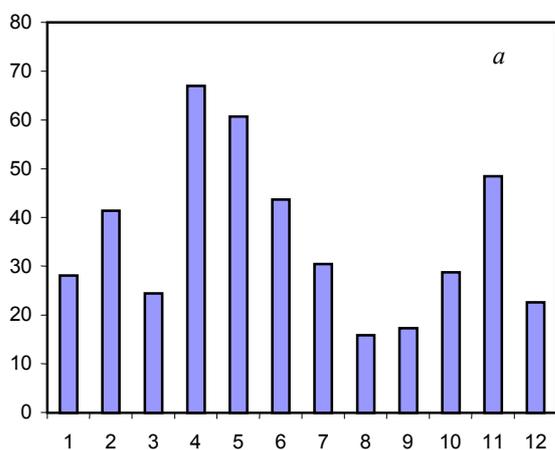


Рис. 3. Диаграммы эксплуатационных характеристик электрического подвижного контакта: *a* – удельная фактическая площадь контакта; *б* – удельная площадь рабочих граней рельефа в скользящем контакте; *в* – удельная проводимость электрического контакта

Диаграммы, приведенные на рис. 3, отражают сравнительное соотношение эксплуатационных характеристик для анализируемых поверхностей. Нумерация столбиков соответствует нумерации образцов приведенной в таблице. Можно утверждать, что минимальные площадки трения и, соответственно, сила трения реализуются для начальных стадий формирования покрытий с использова-

нием импульсных токов без наполнения ультрадисперсными алмазами и на начальных стадиях формирования покрытия при наполнении УДА на постоянных токах. Наиболее высокая проводимость контакта имеет место в случаях 7 и 8 и 10, 11. Однако, для поверхностей 10, 11 будет также высокой сила трения. Поэтому режимы 7 и 8 можно рекомендовать как наиболее эффективные при формировании покрытий серебра электротехнического назначения.

Таким образом, созданы методики для экспресс-анализа поверхностей электрических контактов базирующиеся на методе атомно-силовой микроскопии и математического моделирования, на основе которых даны рекомендации по режимам формирования покрытий серебра, в том числе УДА наполненных, в зависимости от времени и характера электрического воздействия при электролизе.

### **Литература**

1. Мушковец И.И., Хмыль А.А., Достанко А.П. Исследование начальных стадий электрокристаллизации на чужеродной подложке композиционных покрытий серебро–УДА/ Тезисы докладов международной научно-технической конференции МАТЕРИАЛЫИ ТЕХНОЛОГИИ 2000. Гомель 2000. С.70–71.
2. Хмыль А.А., Кушнер Л.К., Полевиков В.М. Чижик С.А. Оптимизация режимов получения покрытий электротехнического назначения из серебра на основании данных сканирующей зондовой микроскопии/ Сборник докладов 3-го Белорусского семинара по зондовой микроскопии. Гродно 2000. С. 57-60.