ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР СЕРЕБРА

А.Д. Замковец[1)], Л.В. Баран[2)], А.С. Кузьмицкая[3)],
В.В. Малютина-Бронская[3)], И.Ю. Фролов[3)]
[1)]*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,*
пр. Независимости 68-2, Минск 220072, Беларусь, a.zamkovets@dragon.bas-net.by
[2)]*Белорусский государственный университет,*
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, brlv@mail.ru
[3)]*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,*
пр. Независимости 68, Минск 220072, Беларусь, malyutina@oelt.basnet.by

Исследованы оптические и электрофизические свойства изготовленных вакуумным испарением и подвергнутым отжигу при температурах 145 и 195ºС наноструктур серебра. Все образцы характеризуются наличием в видимом диапазоне выраженной полосы поверхностного плазмонного резонанса поглощения и представляют собой плотноупакованные монослои наночастиц, средние размеры которых увеличиваются от ~ 10-12 нм в свежеприготовленных образцах до ~ 30 и 40 нм в отожженных. Обсуждается влияние на спектральные характеристики образцов различных факторов, в том числе оксидных включений, наличие которых косвенно подтверждается электрофизическими измерениями.

Ключевые слова: наночастицы серебра; поверхностный плазмонный резонанс; ближнее поле; вольт-амперная характеристика.

EFFECT OF ANNEALING ON THE OPTICAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF SILVER NANOSTRUCTURES

A.D. Zamkovets[1)], L.V. Baran[2)], A.S. Kuz'mitskaya[3)],
V.V. Malyutina-Bronskaya[3)], I.Yu. Frolov[3)]
[1)]*Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,*
68-2 Nezavisimosti Ave., 220072 Minsk, Belarus, a.zamkovets@dragon.bas-net.by
[2)]*Belarusian State University, brlv@mail.ru*
4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus
[3)]*SSPA «Optics, optoelectronics and laser technology»,*
Nezavisimosti Ave., 68, 220072, Minsk, Belarus, malyutina@oelt.basnet.by

The optical and electrophysical properties of silver nanostructures fabricated by vacuum evaporation and annealed at temperatures of 145 and 195°C have been studied. All samples are characterized by the presence of a pronounced band of surface plasmon absorption resonance in the visible range and are close-packed monolayers of nanoparticles, the average size of which increases from ~ 10–12 nm in freshly prepared samples to ~ 30 and 40 nm in annealed ones. The effect of various factors on the spectral characteristics of samples, containing oxide inclusions, the presence of which is indirectly confirmed by electrophysical measurements, is discussed.

Keywords: silver nanoparticles; surface plasmon resonance; near field; volt-ampere characteristic.

Введение

Наноструктуры, в составе которых содержатся наночастицы благородных металлов, привлекают внимание многих исследователей [1]. Для серебра, по сравнению с другими благородными металлами, достигается наиболее высокая добротность полосы поверхностного плазмонного резонанса поглощения (ППРП) [2]. Несмотря на наличие большого числа работ, посвященных изучению оптических и электрофизических свойств нано- и микроструктур серебра, вопросы установления взаимосвязи морфологии таких структур с их оптическими и электрофизическими свойствами изучены недостаточно. Между тем, установление подобной взаимосвязи может быть полезным при разра-

ботке функциональных оптоэлектронных элементов, например, сенсоров, в которых предполагается использование эффектов ближнего поля для управления электрофизическими характеристиками.

Методы исследования

Экспериментальные образцы изготавливались вакуумным испарением и последующей конденсацией атомов серебра на стеклянных подложках при комнатной температуре. Спектральные характеристики образцов записывались на спектрофотометре «Cary 500». Морфология поверхности пленок исследовалась с помощью сканирующего зондового микроскопа NEXT II (ООО «НТ-МДТ», Россия) в режиме амплитудно-частотной модуляции методом постоянной силы [3]. Использовались бесконтактные суперострые кремниевые кантилеверы вискерного типа с радиусом кривизны кончика иглы не более 3 нм. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) структур Ag/стекло проводилось с помощью автоматизированного базового лазерного испытательного комплекса. Отжиг образцов производился в сушильном шкафу с выдержкой в течение 30 минут при максимальной температуре (соответственно при 145 и 195ºС).

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены нормированные спектры оптической плотности наноструктур серебра до и после отжига. Как видно из данного рисунка, все образцы характеризуются наличием в видимом диапазоне выраженной полосы ППРП. Приведенные на рис. 1 спектры типичны для 3 групп из 9 исследованных образцов (3 свежеприготовленных и по 3 отожженных при различных температурах). Отличия в спектральном положении максимумов полос ППРП для образцов одной группы не превышали 10-20 нм. Максимум полосы ППРП свежеприготовленной пленки Ag располагается на длине волны 525 нм.

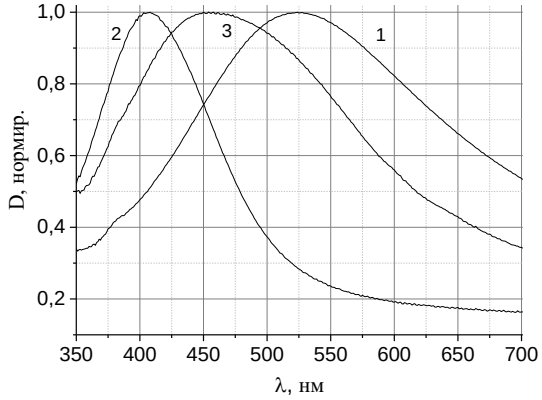

Рис. 1. Нормированные спектры оптической плотности наноструктур серебра на стеклянных подложках до отжига (1) и после отжига при температуре 145 (2) и 195ºС (3)

После отжига при температуре 145ºС происходит коротковолновый сдвиг максимума ППРП до $\lambda \approx 410$ нм. Подобный сдвиг отмечается в литературе [4]. Увеличение температуры отжига до 195ºС сопровождается длинноволновым сдвигом максимума ППРП, который, тем не менее, является коротковолновым относительно неотожженной пленки.

На рис. 2 приведены АСМ-изображения рельефа поверхности данных пленок.

Средние размеры частиц в свежеприготовленных пленках серебра составляют 10-12 нм. При этом частицы плотно упакованы в монослое. Проведение отжига приводит к увеличению средних латеральных размеров частиц в образцах до ~ 20-30 нм, а затем к их дальнейшему укрупнению до ~ 35-40 нм. При этом неоднородность поверхности не сильно возрастает. Это может свидетельствовать об отличии формы наночастиц от сферической, о некоторой «сплюснутости» частиц.

Связанное с укрупнением частиц в процессе отжига уменьшение их количества в монослое может являться одной из причин коротковолнового спектрального сдвига максимума полосы ППРП отожженной пленки относительно максимума свежеприготовленной. На спектральное положение максимума полосы

ППРП могут оказывать влияние и другие факторы. Это наличие оксидных оболочек в наночастицах, а также проявление латеральных электродинамических взаимодействий между плотноупакованными металлическими наночастицами [2, 5]. Можно ожидать, что в нашем случае имеет место конкуренция всех перечисленных факторов.

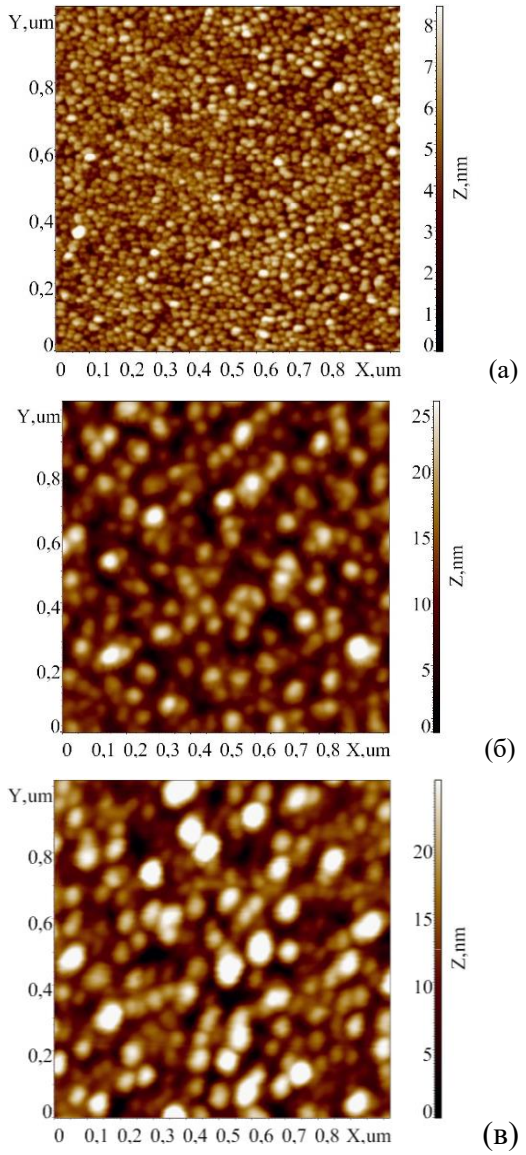

Рис. 2. АСМ-изображения рельефа поверхности пленок серебра: а – свежеосажденной; б и в – после отжига при температуре 145 и 195°С соответственно

На рис. 3 приведены продольные вольт-амперные характеристики (ВАХ) свежеприготовленной (кривая 1) и отожженных пленок серебра при температурах 145 и 195°С (кривые 2 и 3 соответственно). Анализируя рис. 3, можно отметить, что для всех образцов повышение напряжения приводит к увеличению величины тока. При этом наблюдаются значительные скачки значений тока, которые в меньшей степени выражены для свежеприготовленного образца и усиливаются для отожженных.

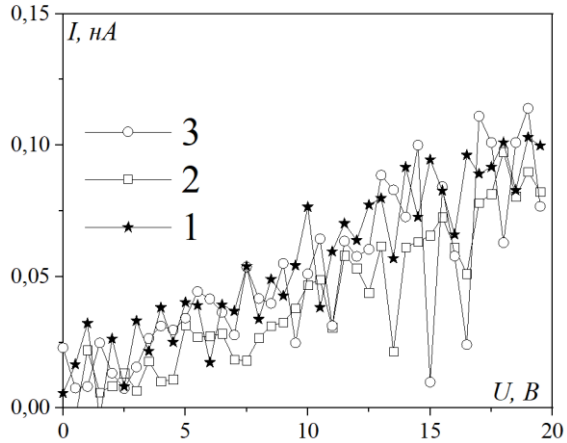

Рис. 3. ВАХ пленок серебра: 1 – свежеосажденной; 2 и 3 – после отжига при температуре 145 и 195°С соответственно

Наблюдаемый вид ВАХ может быть обусловлен тем, что уже для свежеприготовленной структуры окислительные процессы могут способствовать изолированности наночастиц серебра. Далее в процессе отжига могут формироваться неоднородные частицы большего размера, содержащие в своем составе оксидные включения. Результат, представленный на рис.3, можно считать косвенным подтверждением влияния на спектральные характеристики исследованных систем таких включений.

Заключение

Установлено, что отжиг даже при относительно небольших температурах (до 200°С) позволяет существенно влиять на спектральные и морфологические характеристики наноструктур серебра. При этом, для открытых пленок малой эффективной толщины (менее 10 нм) значительное влияние на оптические и элек-

трофизические свойства могут оказывать окислительные процессы.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке ФФИ РБ (проект Ф23В-007).

Библиографические ссылки

1.Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит; 2009. 480 с.
2. Kreibig U., Volmer M. Optical Properties of Metal Clusters. Berlin.: Springer; 1995. 533p.
3. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии, Москва: Техносфера; 2004. 144 с.
4. Westphalen M., Kreibig U., Rostalski J, Lüth H., Meissner D. Metal cluster enhanced organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2000; 61(1): 97-105.
5. Замковец А.Д., Качан С.М., Понявина А.Н. Высокий сенсорный потенциал самоорганизующихся металлических наноструктур. *Сенсорная электроника и микросистемные технологии* 2008; (4): 74-79.