

УДК 004.942

## **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОКЛАСТЕРНЫХ СТРУКТУР НА ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ: МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ**

Зотов А.И., студент гр. НТ-120, IV курс

Научный руководитель: Бухаров Д.Н., к.ф.-м.н., доцент

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

Получение тонких пленок является актуальной проблемой в области микро-нанoeлектроники и нанoфотоники. Это позволяет управлять функциональными характеристикам с помощью таких элементов из соответствующего по составу коллоида, полученного при лазерной абляции мишени в жидкости. Последующее осаждение коллоидных частиц представляется наиболее простым решением этой проблемы при высыхании капли.

Металлические наночастицы золота (Au) и серебра (Ag) осаждались на площади контакта капли со стеклянной подложкой. Капли во время испарения благодаря силам натяжения, преобладающим над силами тяжести, образуют сферическую форму наночастиц. При этом они препятствовали смещению границы раздела фаз, а их площадь не менялась.

В качестве материала были использованы дисперсные наночастицы золота и серебра размером 10 нм в пропорции 50% каждый. Лазер мощностью  $P = 2$  Вт и интенсивностью  $I \leq 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> воздействовал на мишень из этих материалов в течение 30 минут. Диаметр лазерного пучка составлял  $d_r = 100$  мкм, а скорость воздействия оказывания пучка при  $v = 100$  мкм/с. Полученный коллоидный раствор подвергался действию ультразвука около 10 мин, а затем был помещен в лабораторную центрифугу марки СМ-6М.

Размеры полученных биметаллических коллоидных частиц исследовались в дальнейшем методом динамического рассеяния света с помощью анализатора Horiba LB-550. Благодаря функции температурного контроля (70-80 С°), частицы оставались стабильными и имели размер в диапазоне от 5 до 10 нм.

При отклонении некоторых параметров Au:Ag-пленка отличалась от заявленных параметров и образовывала сложные структуры фрактального типа [1]: ветвистую, коховскую и другие формы. Следовательно, биметаллические структуры в тонкой пленке могут содержать топологические объекты, реализуемые управляемым образом. На рисунке 1 представлено изображение структуры, полученное с помощью растрового микроскопа одного из участка пленки.

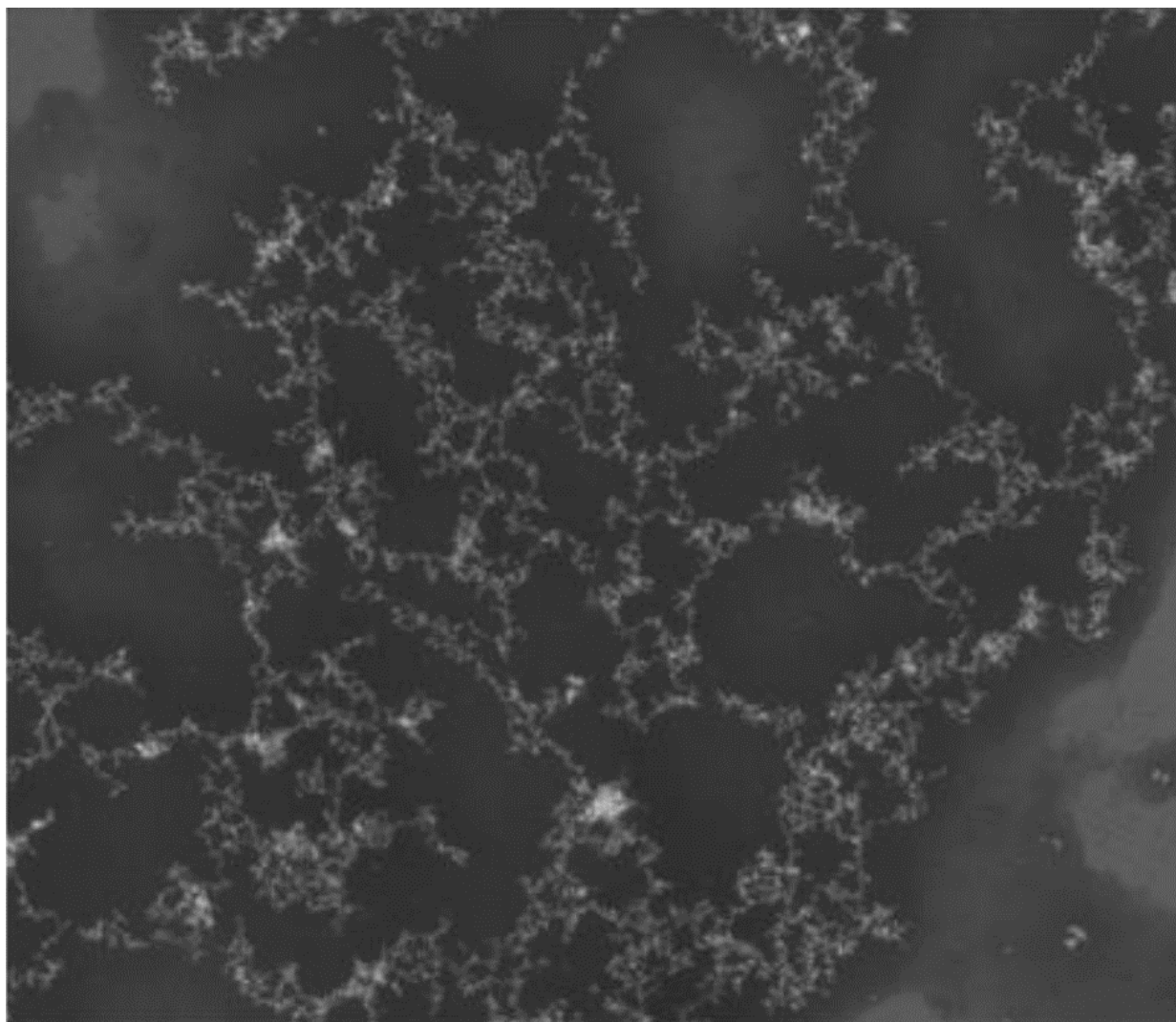


Рисунок 1 – Топология полученной биметаллической ветвистой пленки

Стохастическая размерность структуры определялась с помощью метода boxcount [2]. Изображение разбивалось на ячейки ( $L = 1$  мкм), в которых анализ велся в двоичной системе. В зависимости от плотности объектов насыщенности ячейки ( $i \geq 80\%$ ), ее можно считать заполненной с параметрами «1» (единица) или «0» (ноль). Соответственно, эта форма информации подавалась в машинную программу и обрабатывалась. На рисунке 2 показан результат анализа.

Вычисления позволяют рассчитать силу прилипания частиц материала:

$$P = -0,067 \cdot \ln(S_c) + D$$

Здесь  $S_c$  является вероятностью прилипания.

Установлено, что при начальном процессе термодинамической диффузии образовано в пределе объема большое количество мелких кластеров, в том числе с размером в один атом. При продолжительном воздействии лазера частицы прилепляются, увеличиваясь в размере, но уменьшаясь в количестве.

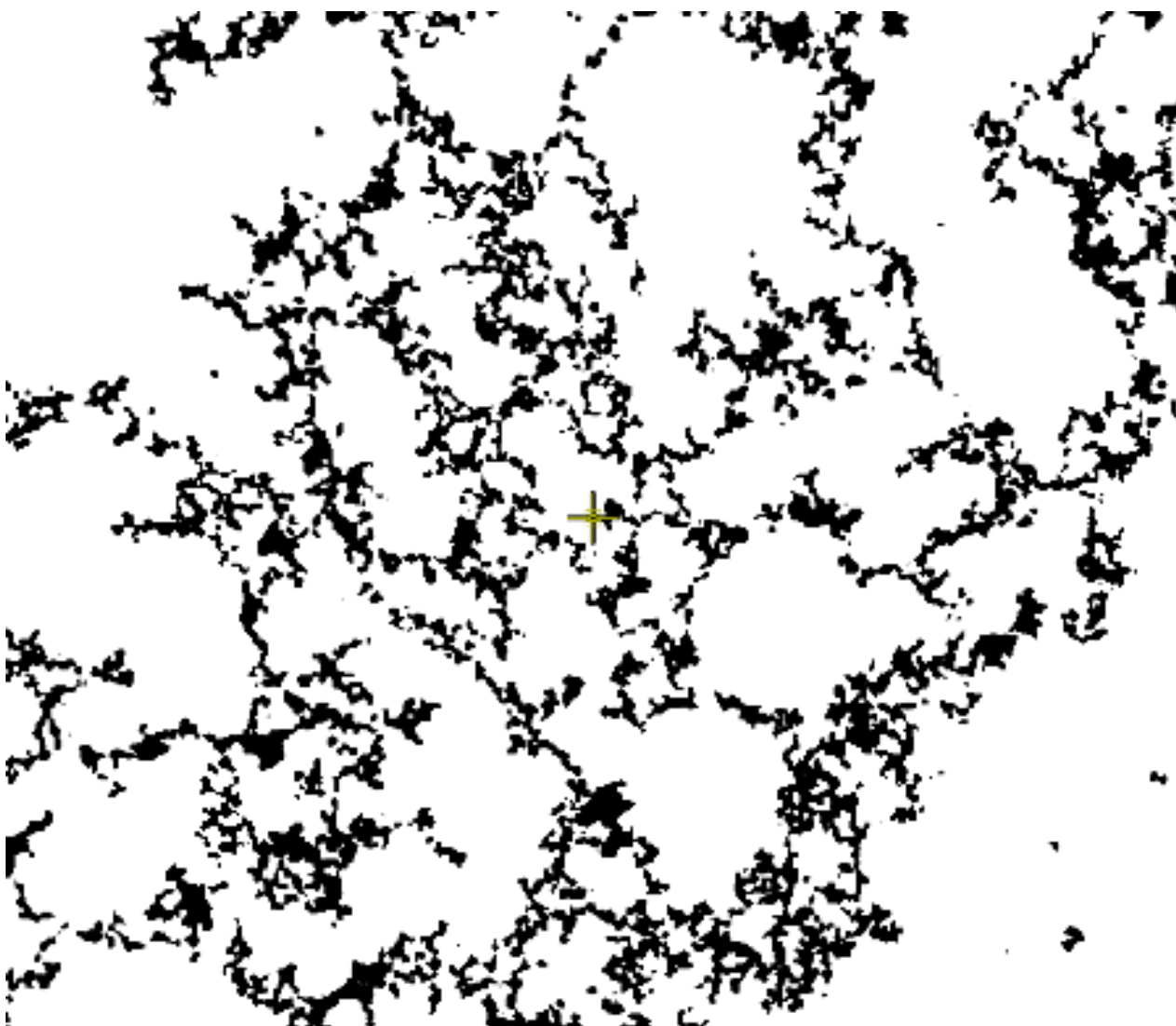


Рисунок 2 – Поверхностный кластер с фрактальной размерностью  $D = 1.656 \pm 0.1308$

Данный процесс позволяет оценить оптическое поглощение  $A$  и пропускание  $T[3]$ , зависящие от фрактальной двумерной размерности  $D$ :

$$D = 1 - T - R - A$$

Тогда пропускание пленки определялось следующим образом:

$$T = 10^{-A}$$

где  $R$  – отражение света.

Рассеяние структуры  $q$  можно найти как среднее значение по функции интенсивности рассеивания  $I(q)$ :

$$I(q) = I(0) / (1 + 2 (qR_G)^2 / 3D)^{D/2}$$

где  $I(0)$  – размерность кластерной частицы.

Следовательно, рассеяние структуры  $q$  можно найти как:

$$q = 4\pi n \sin(\theta) / \lambda$$

где  $\theta$  – угол рассеяния,  $\lambda$  – длина волны излучения, а  $n$  – показатель преломления среды.

Зависимость биметаллической пленки от волнового вектора представлена рисунком 3. Данный график показывает увеличение для случая микроизлучения и уменьшением фрактальной размерности. Это связано со сложным видом структуры, на котором и происходит рассеяние света.

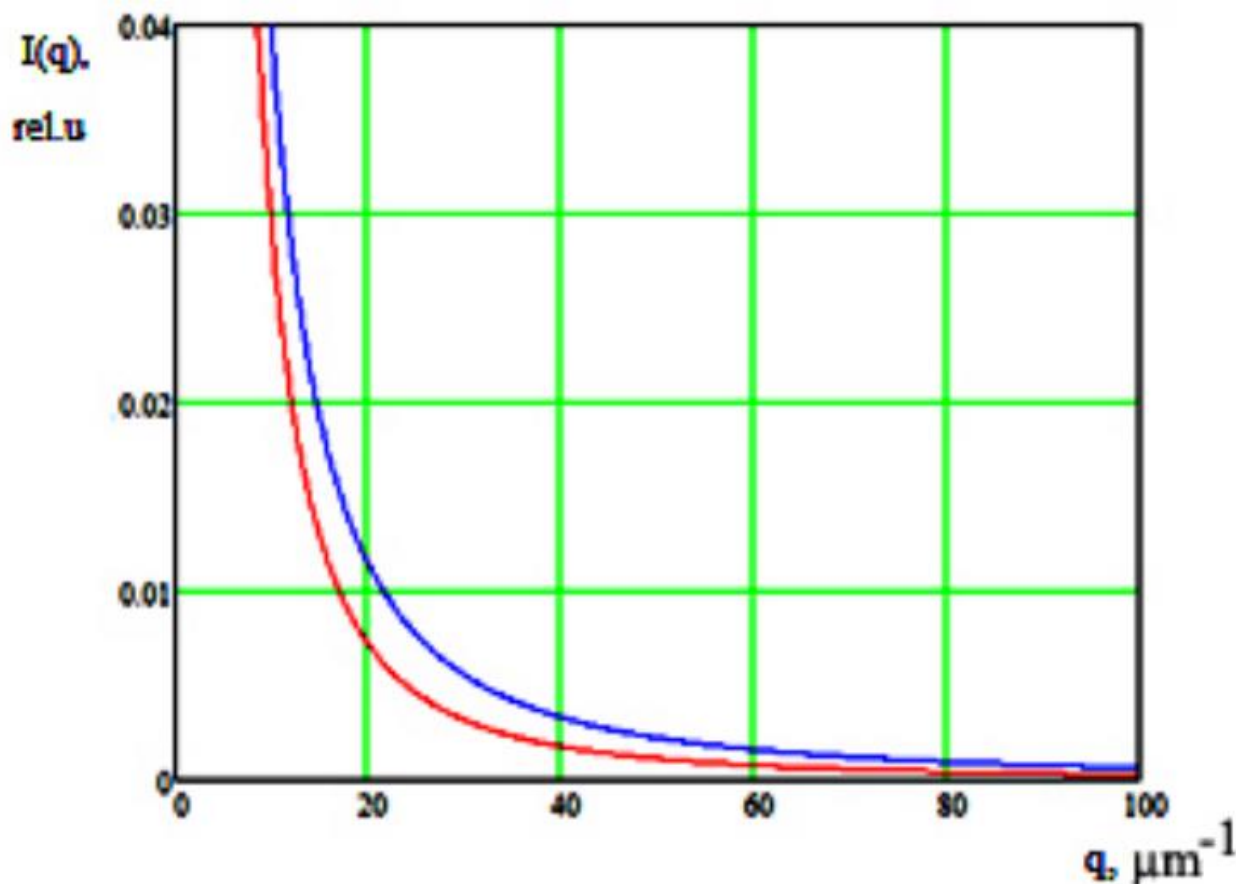


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности рассеяния от волнового вектора.

Также проведено исследование с помощью вольт-амперной характеристики для выявления электропроводных свойств пленки[4]. Для этого использовалась модель, закономерная с законом Ома:

$$I = U/R$$

где  $U$  – напряжение, а  $R$  – сопротивление фрактальной модели.

На рисунке 4 изображена вольтамперные характеристики Au:Ag-пленки в линейном диапазоне при воздействии на него лазерного пучка.

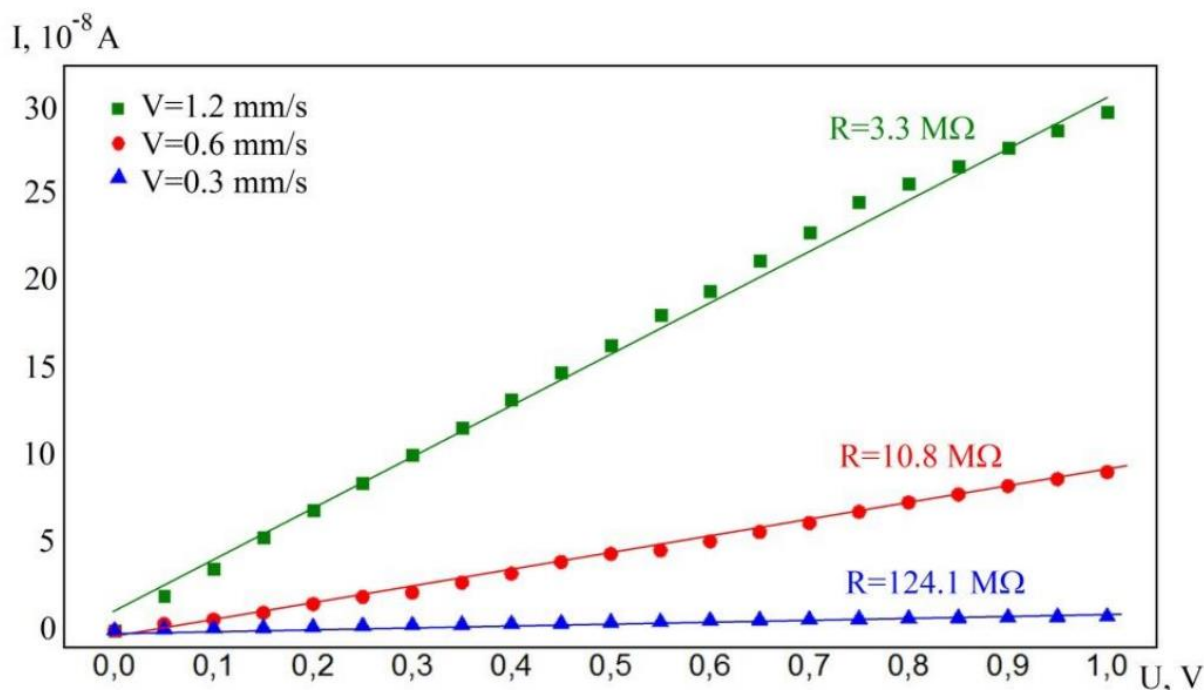


Рисунок 4 – Вольтамперные характеристики Au:Ag-пленок при различных скоростях движения лазерного пучка

Таким образом, при исследовании тонкопленочных биметаллических систем выяснено, что можно получить материалы с уникальными спектрами свойств, поэтому они будут широко востребованы. Однако контроль характеристик сложен и требует дальнейшего ряда инновационных подходов

#### Список литературы:

1. Antipov, Alexander & Bukharov, Dmitriy & Arakelyan, S & Osipov, A. & Lelekova, Anastasia. (2018). Bimetallic clustered thin films with variable electro-optical properties. Journal of Physics: Conference Series. 951. 012013. 10.1088/1742-6596/951/1/012013.
2. Moisy F. Computing a fractal dimension with Matlab: 1D, 2D and 3D Box-counting, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13063-boxcount/content/boxcount/html/demo.html>, своб]
3. Б. М. Смирнов, Фрактальные кластеры, УФН, 1986, том 149, номер 2, 177–219.
4. A.O.Kucherik et al. Structure and morphology effects on the optical properties of bimetallic nanoparticle films laser deposited on a glass substrate / A. O. Kucherik, S. M. Arakelyan, S. V. Kutrovskaya, A. V. Osipov, A. V. Istratov, T. A. Vartanyan, T. E. Itina // Journal of Nanomaterials. – 2017. – vol. 2017. Article ID 8068560 (9pp).