

# Структура трёхмерных голограмм, полученных в галогенидосеребряных средах на основе нанопористых силикатных матриц

*О. В. Андреева, В. А. Пономарёва, Н. В. Андреева, М. Г. Хохлов*

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Представлена методика выделения проявленных частиц серебра из силикатного каркаса и получения разбавленных препаратов, пригодных для исследования оптическими методами.

*Ключевые слова:* Трёхмерные голограммы, Галогенидосеребряные среды, Нанопористые силикатные матрицы.

*Цитирование:* Андреева, О. В. Структура трёхмерных голограмм, полученных в галогенидосеребряных средах на основе нанопористых силикатных матриц / Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 337–340.

## Введение

Трёхмерные голограммы, регистрируемые в галогенидосеребряных светочувствительных средах с использованием процесса химико-фотографического проявления, как было показано в ряде публикаций [1], формируются в виде пространственного распределения коллоидных наночастиц металлического серебра преимущественно сферической формы. В настоящей работе рассмотрены трёхмерные голограммы в галогенидосеребряных средах на основе нанопористых силикатных матриц (НПСМ) [2] и предложена методика, позволяющая выделить частицы серебра из проявленного образца среды НПСМ/AgHal.

## 1. Приготовление препаратов

Изготовление препарата включает два основных этапа: измельчение исследуемой части образца до порошкообразного состояния; растворение порошка в водном растворе щелочи (КОН – 0,5 М).

Физические причины, обеспечивающие в этом случае получение препарата с равномерным распределением частиц металла по высоте столба жидкости:

- растворимость частиц силикатного каркаса в щелочи и химическая устойчивость по отношению к щелочи частиц металла;
- диффузия частиц металла в жидкости при освобождении из силикатного каркаса;
- равномерное распределение частиц металла в объеме жидкости за счет броуновского движения (Примечание: для частиц серебра диаметром менее 50 нм скорость перемещения в объеме жидкости за счет броуновского движения в несколько раз превышает скорость перемещения за счет процесса седиментации).

В то же время агломерация частиц металла и гелеобразование жидкой фазы являются отрицательными факторами. Жизненный цикл препарата с момента заливки порошка водным раствором щелочи включает следующие основные этапы:

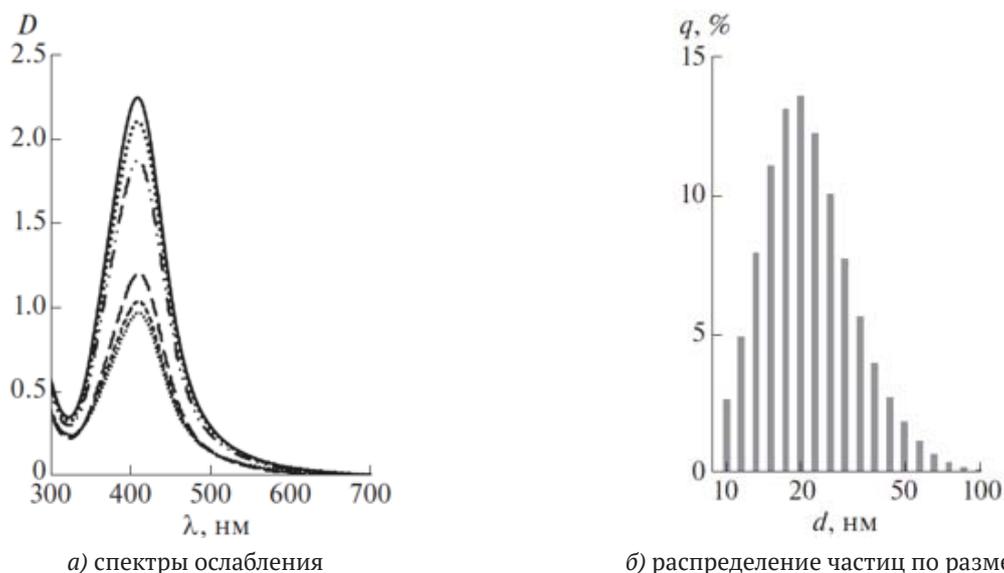
- растворение частиц каркаса и диффузия частиц металла в объеме жидкости;
- стабильное состояние ансамбля частиц металла в жидкости – именно на этом этапе возможно изучение структуры выделенных частиц;
- нарушение стабильности системы – увеличение размера частиц металла за счет агломерации и гелеобразование жидкой фазы – препарат мутнеет и становится непригодным для оптических измерений.

## 2. Приготовление препаратов

Для контроля параметров препаратов использованы два оптических метода: спектральные измерения на приборе Evolution 300 и измерения функции распределения частиц по размерам методом динамического рассеяния света на приборе Horiba LB-550.

Непосредственно после приготовления препарат представляет собой мутную жидкость слегка желтоватого оттенка. При хранении препарата жидкость становится прозрачной, а на дне емкости виден белый осадок, который с течением времени исчезает.

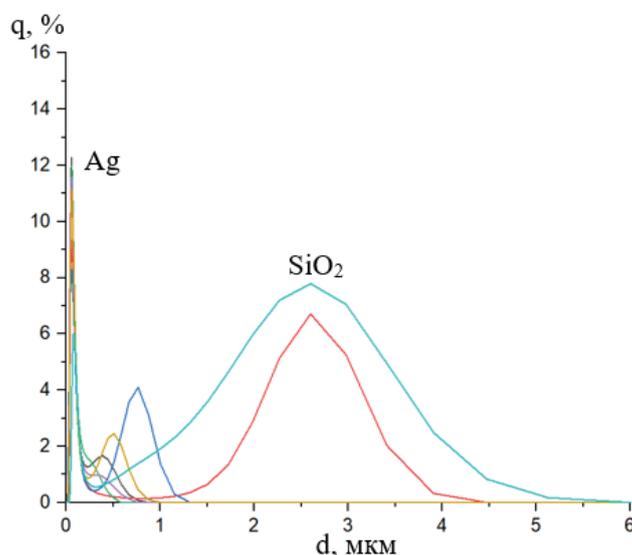
На рис.1а представлены спектры ослабления препарата в период 3–8 суток с момента изготовления препарата и его заливки в кювету спектрофотометра. Контроль характеристик производился на высоте (15–20) мм от дна кюветы и продолжался до установления стабильной концентрации частиц серебра в исследуемой части кюветы. Ярко выраженный максимум оптической плотности спектра ослабления на длине волны  $\sim 410$  нм ( $D_{\max}$ ), обусловленный плазмонным резонансом частиц металлического серебра, проявляется уже через сутки после изготовления препарата. С течением времени происходит увеличение  $D_{\max}$ , что свидетельствует об увеличении концентрации частиц серебра. Важным фактором является неизменность формы спектров ослабления при увеличении концентрации, что свидетельствует о стабильности характеристик ансамбля частиц, выделенных из силикатного каркаса.



**Рис. 1.** Спектры ослабления водной суспензии проявленных частиц серебра, выделенных из нанопористой матрицы, в период от 1 до 8 суток с момента изготовления препарата (а), распределение частиц по размерам в препарате после 8 суток (б)

Контроль, проведенный при стабильном состоянии препарата методом динамического рассеяния света, представлен на рис.1б в форме гистограммы, характеризующей распределение частиц по размерам.

Распределение частиц по размерам в препарате на этапе растворения каркаса приведено на рис. 2.



**Рис. 2.** Распределение по размерам частиц серебра (Ag) и каркаса ( $\text{SiO}_2$ ) в препарате при его перемешивании после 5 суток хранения

В этом случае перед проведением измерений препарат был перемешан и показал наличие как наночастиц металлического серебра, Ag, так и наличие крупных частиц, относящихся к элементам каркаса,  $\text{SiO}_2$ . Следует отметить, что на восьмой день хранения препарата после его перемешивания наблюдалось только стабильное распределение частиц

серебра при отсутствии более крупных частиц, что подтверждает данные спектральных измерений.

### **Заключение**

Анализ экспериментальных данных, полученных на ряде образцов с разной биографией позволил оценить временные промежутки этапов жизненного цикла исследуемых препаратов с момента их изготовления и определить рабочий режим использования препаратов для проведения исследований структуры ансамбля частиц металлического серебра, формирующих трехмерную голограмму. Для использованных образцов этот режим составляет период от 7 до 38 суток после изготовления препарата.

Предложенная методика при соответствующей модификации может быть использована и в ряде других случаев, таких как: выделение металлических частиц, сформированных внутри свободного объёма пор силикатной матрицы разными способами, например при пропитке НПСМ солями металла с последующим восстановлением металла. А также может быть использована для выделения неорганических частиц, сформированных в свободном объёме пор силикатных матриц при условии их химической устойчивости к воздействию щелочи.

### **Список источников**

- [1] **Андреева О. В.** Плазмонные частицы коллоидного серебра в высокоразрешающих регистрирующих средах / Н. В. Андреева, Т. Б. Кузьмина // Оптика и спектроскопия. — 2017. — Т. 122. — № 1. — С. 58–65.
- [2] **Андреева О. В.** Нанопористые силикатные матрицы для голографии и биомедицины / Е. П. Быков, А. О. Исмагилов, А. Pandya, И. Ю. Щелканова, Н. В. Андреева // Оптика и спектроскопия. — 2021. — Т. 129. — № 4. — С. 418–426.

## **The structure of volume holograms recorded in silver halide media on basis of nanoporous silicate matrices**

*O. V. Andreeva, V. A. Ponomaryova, N. V. Andreeva, M. G. Khokhlov*  
ITMO University, Saint Petersburg, Russia

The technique for researching the structure of holograms formed by metallic silver nanoparticles using photographic process is presented. The technique is based on separation of metal particles from a silicate framework by dissolving it and forming aqueous suspensions of silver particles, the research of which by optical methods allows us to obtain information about the parameters of the developed particles.

*Keywords:* Volume holograms, Silver halide media, Nanoporous silicate matrices.