

Научная статья
 УДК 535.3
 ББК 22.343
 ГРНТИ 29.31.21
 ВАК 1.3.6.
 PACS 42.50.Gy
 OCIS 190.4870
 MSC 78A10

Исследование физических свойств голограммической памяти на атомных кластерах

Е. А. Илюшкина  ¹

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 12 ноября 2025 года
 После переработки 17 ноября 2025 года
 Опубликована 31 декабря 2025 года

Аннотация. Рассмотрены физические свойства голограммической памяти на атомных кластерах. Целью работы является теоретическое исследование физических свойств голограммической памяти, основанной на атомных кластерах, для оценки их потенциала в хранении и обработке данных в системе взаимодействующих нанокластеров в нанокомпозитной среде, находящейся во внешнем поле оптической волны. Мотивация исследования обусловлена растущей потребностью в высокомощных и устойчивых системах хранения информации в условиях миниатюризации оптоэлектронных устройств. В рамках исследования применялись методы квантовой механики и оптической голограммы для моделирования. Практическая значимость исследования состоит в возможности применения атомных кластеров в разработке новых поколений оптических запоминающих устройств.

Ключевые слова: оптическое излучение, кластер, атомный кластер, нанокомпозитная среда, голограммическая память

Введение

В современном мире объём информации, который приходится обрабатывать каждый день, неуклонно растёт. В связи с этим возникает необходимость в создании новых технологий для хранения и передачи информации. Одной из таких технологий является голограммическая память, основанная на использовании голограммы системы атомных кластеров, находящихся в поле оптического излучения. Голограммическая память основана на принципе голограммы, который заключается в записи, хранении и восстановлении информации на трёхмерной поверхности среды с атомными кластерами, обладающей потенциалом высокой скорости передачи данных и плотности записи, которая может быть реализована с использованием объёмных голограмм или поверхностных голограмм. В условиях стремительного развития информационных технологий

¹E-mail: elenailuskina2004@gmail.com

актуальность исследования физических свойств голограммической памяти на атомных кластерах обусловлена необходимостью создания высокоёмких систем хранения данных, устойчивых к внешним воздействиям.

Исследование физических характеристик системы нанокластеров в нанокомпозитной среде актуально в связи с растущим интересом к нанотехнологиям и практическому применению в наноэлектронике.

Целью работы является теоретическое исследование физических свойств голограммической памяти, основанной на атомных кластерах, для оценки их потенциала в хранении и обработке данных в системе взаимодействующих нанокластеров в нанокомпозитной среде, находящейся во внешнем поле оптической волны. Задачи исследования включают в себя написание обзора литературы по свойствам нанокластеров в нанокомпозитных средах, разработку теоретической модели отражения нанокомпозитной среды с системой нанокластеров, численное исследование отражения нанокомпозитной среды с системой нанокластеров.

Объектом исследования является система нанокластеров в нанокомпозитной среде. Предметом исследования является набор физических характеристик системы нанокластеров в нанокомпозитной среде.

Для проведения исследования используются следующие методы: анализ научной литературы по свойствам нанокластеров в нанокомпозитных средах, теоретические методы оптики для описания взаимодействия системы нанокластеров с матрицей нанокомпозитной среды, численные методы оптики для изучения взаимодействия нанокластеров с матрицей нанокомпозитной среды. Материалы исследования включают в себя металло-диэлектрические нанокомпозиты с нанокластерами.

Гипотеза исследования заключается в том, что если использовать теоретические модели оптических процессов в системе нанокластеров в нанокомпозитных средах и результаты численных расчётов, то можно добиться усиленного оптического пропускания нанокомпозитной среды с нанокластерами, изменяя различные параметры нанокомпозитной среды.

Научная новизна исследования состоит в том, что исследование физических характеристик системы нанокластеров в нанокомпозитной среде проводится с использованием компьютерных сред для научных расчётов с учётом влияния геометрических размеров и формы нанокластеров на физические свойства нанокомпозитных сред, находящихся в поле оптической волны.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что исследование физических характеристик системы нанокластеров в нанокомпозитной среде играет важную роль для понимания физических процессов, происходящих в системах нанокластеров. Практическая значимость исследования заключается в том, что результаты исследования могут быть использованы для разработки наноматериалов с уникальными физическими свойствами в наноразмерной оптоэлектронике при разработке высокоэффективных солнечных элементов, солнечных батарей, солнечных панелей.

Обзор

В статье [1] обсуждается голограммическая ассоциативная память, приводятся результаты экспериментов по изучению её способности к воспроизведению. В статье [2] обсуждается голограммическая декларативная память, модель векторного пространства, основанная на семантике распределения, которая обеспечивает гибкую и масштабируемую альтернативу символическим когнитивным архитектурам. В статье [3] обсуждается предлагаемая система поверхностной голограммической памяти, которая обеспечивает высокую скорость передачи данных и стабильную производительность считывания. В статье [4] обсуждается использование магнитного носителя голограммной памяти

для оптического хранения. В статье [4] упоминается, что голограммная память является сильным кандидатом на роль оптического хранилища из-за её высокой плотности записи и высокой скорости передачи данных. В статье [5] приводятся сведения о голограммической памяти.

Нанокомпозиты, включающие нанокластеры, продемонстрировали значительный потенциал в оптической области, особенно благодаря своим уникальным физическим свойствам для применения в оптоэлектронных приложениях. Золотые нанокластеры отличаются своими настраиваемыми структурами и разнообразными оптическими свойствами, что делает их пригодными для диагностических и терапевтических применений в биологической области. Эти нанокомпозиты улучшают присущие золотым нанокластерам оптические характеристики, которые имеют решающее значение для биологического зондирования и оптического лечения [6]. Фотофункциональные композиты на основе золотых нанокластеров являются перспективными биоматериалами с улучшенными оптическими свойствами для диагностических и терапевтических применений. Изучаются их поведение и функции сборки, подчеркивая их потенциал в зондировании и лечении [6]. Аналогичным образом были разработаны флуоресцентные нанокомпозиты серебряных нанокластеров путём их интеграции в полимерные матрицы, что помогает преодолевать такие проблемы, как разделение фаз и агрегация, которые обычно снижают эффективность флуоресценции. Эти композиты особенно эффективны в таких приложениях, как обнаружение ионов Hg^{2+} и генерация белого света, демонстрируя свою полезность в оптическом зондировании и освещении [7]. Кроме того, совместная сборка нанокластеров с наночастицами может привести к иерархическим структурам с коллективными свойствами, полезными для приложений в химическом обнаружении, сборе света и передовой оптической связи [8]. В области оптоэлектронники нанокомпозиты играют ключевую роль в повышении производительности таких устройств, как органические солнечные элементы и светодиоды с квантовыми точками, предлагаая уникальные электрические, оптические и механические свойства. Нанокомпозиты, включающие нанокластеры, могут значительно улучшить оптические свойства в оптоэлектронных устройствах. Уникальные характеристики нанокластеров, такие как их локальный эффект поверхности плазмонного резонанса, могут улучшить интенсивность света при размещении вблизи люминесцентных материалов. Интеграция этих нанокластеров в нанокомпозиты прокладывает путь для передовых оптических приложений и повышения эффективности устройств. Кроме того, растягиваемая оптика на основе нанокомпозитов с использованием наночастиц серебра, обеспечивает прочные и гибкие оптические устройства, сохраняющие производительность при многократных деформациях, расширяя их применимость в различных оптических системах [9]. В статье [9] сверхкластерная лучевая имплантация наночастиц серебра в эластомерную подложку, канавки которой были получены формированием, позволяет эффективно изготавливать дешевые и простые растягиваемые оптические элементы, способные выдерживать тысячи деформаций и циклов растяжения без ухудшения их оптических свойств.

Модель

Представим математическую модель, описывающую физические свойства атомных кластеров в контексте голограммической памяти. Волновая функция для N атомов в атомном кластере может быть представлена в виде:

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N) = \prod_{i=1}^N \phi_i(\mathbf{r}_i) \cdot \chi(\mathbf{R}), \quad (1)$$

где $\phi_i(\mathbf{r}_i)$ – атомная орбиталь i -го атома, \mathbf{r}_i – координаты электронов, $\chi(\mathbf{R})$ – функция ядерных координат \mathbf{R} . Вывод: Это приближение Борна-Оппенгеймера, где электронная

и ядерная части разделены. Эта формула упрощает расчёты, но игнорирует электронно-ядерные взаимодействия на малых масштабах. Далее, энергия кластера:

$$E = \langle \Psi | H | \Psi \rangle , \quad (2)$$

где H – оператор Гамильтона. Минимизация этой энергии с учётом вариационного принципа даёт стабильные конфигурации кластеров.

Для голограмм рассмотрим интерференцию волн. Амплитуда волны в точке (x, y, z) имеет вид:

$$A(x, y, z) = A_0 e^{ikz} + A_1 e^{i(k_x x + k_y y + kz)} , \quad (3)$$

где k – волновое число, A_0 – опорная волна, A_1 – объектная волна. Интенсивность волны вычисляется через амплитуду волны по формуле:

$$I(x, y, z) = |A(x, y, z)|^2 , \quad (4)$$

которая следует из определения амплитуды. Интенсивность определяет распределение энергии в голограмме.

Электронная плотность имеет вид:

$$\rho(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N |\psi_i(\mathbf{r})|^2 . \quad (5)$$

Электронная плотность влияет на оптические свойства системы атомных кластеров.

Плотность состояний электронов в атомном кластере имеет вид:

$$D(E) = \frac{dN}{dE} = \frac{3N}{2E_F} \sqrt{\frac{E}{E_F}} , \quad (6)$$

где E_F – энергия Ферми системы электронов в атомном кластере.

Пусть $\Delta\sigma$ есть некоторый элемент поверхности в окрестности точки наблюдения \mathbf{r}_i в плоскости голограммы. Тогда интенсивность оптического излучения в точке наблюдения \mathbf{r}_i определим по следующей формуле:

$$I(\mathbf{r}_i) = I_\sigma(\mathbf{r}_i) \Delta\sigma = (E_z^* H_x - E_x^* H_z + E_z H_x^* - E_x(\mathbf{r}_i) H_z^*) \Delta\sigma , \quad (7)$$

где величины \mathbf{E} , \mathbf{H} определены в точке \mathbf{r}_i . Изменяя точку наблюдения, найдём распределение интенсивности интерферирующих полей в плоскости голограммы. Коэффициент поляризуемости j -го атома в атомном кластере имеет вид:

$$\alpha_j = \frac{e^2}{m} \frac{1}{\omega^2 - \omega^2 - i2\omega/T_j} . \quad (8)$$

Введём функции $G = 1/R^3 - ik_0/R^2$, $F = G - k_0^2/R$. Выражения для эффективных поляризуемостей j -го атома $\alpha_y^{\text{eff}}(j)$, $\alpha_\beta^{\text{eff}}(j)$ при $\beta = x, z$ в присутствии другого атома квантово-размерного объекта имеют вид:

$$\alpha_y^{\text{eff}}(1) = \alpha_1 \frac{1 + 2\alpha_2 G \exp(i(k_0 R + \mathbf{k}_0 \mathbf{R}))}{1 - 4\alpha_1 \alpha_2 G^2 \exp(ik_0 R)} , \quad (9)$$

$$\alpha_\beta^{\text{eff}}(1) = \alpha_1 \frac{1 - \alpha_2 F \exp(i(k_0 R + \mathbf{k}_0 \mathbf{R}))}{1 - \alpha_1 \alpha_2 F^2 \exp(ik_0 R)} , \quad (10)$$

$$\alpha_y^{\text{eff}}(2) = \alpha_2 \frac{\exp(\mathbf{k}_0 \mathbf{R}) + 2\alpha_1 G \exp(i(k_0 R))}{1 - 4\alpha_1 \alpha_2 G^2 \exp(ik_0 R)} , \quad (11)$$

$$\alpha_\beta^{\text{eff}}(2) = \alpha_2 \frac{\exp(\mathbf{k}_0 \mathbf{R}) - \alpha_1 F \exp(i(k_0 R))}{1 - \alpha_1 \alpha_2 F^2 \exp(ik_0 R)} . \quad (12)$$

Для неточечного квантово-размерного объекта из различных атомов $\alpha_1 \neq \alpha_2$, $\omega_1 \neq \omega_2$ и $(\mathbf{k}_0 \mathbf{R})$ отлично от нуля. Для фаз Φ_j^γ поляризующих полей j -го атома объекта получим формулу:

$$\Phi_j^\gamma = \arccos \left(\frac{\operatorname{Re} \alpha_\gamma^{\text{eff}}(j)}{\sqrt{(\operatorname{Re} \alpha_\gamma^{\text{eff}}(j))^2 + (\operatorname{Im} \alpha_\gamma^{\text{eff}}(j))^2}} \right) + 2\pi n, \quad (13)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$, $\gamma = x, y, z$. Разность фаз, соответствующая когерентному сложению поляризующих полей атомов 1 и 2 квантово-размерного объекта, для полей равна:

$$\delta_{21}^\gamma = k_0 \sqrt{\left(-\frac{L_x}{2} + \ell \Delta x\right)^2 + R_0^2 + \left(-\frac{L_z}{2} - p \Delta z\right)^2} - k_0 \sqrt{\left(-\frac{L_x}{2} + \ell \Delta x\right)^2 + (R_0 - R)^2 + \left(-\frac{L_z}{2} - p \Delta z\right)^2} + \Phi_1^\gamma - \Phi_2^\gamma, \quad (14)$$

где $p, \ell = 1, 2, 3, \dots$, $\Delta x, \Delta z$ представляют собой малые приращения вдоль координатных осей x и z , в плоскости голограммы $\Delta\sigma = \Delta x \Delta z$, имеющей линейные размеры L_x, L_z, R_0 – расстояние от атома 1 до центра голограммы, находящейся в плоскости xz . Рассмотрим теперь члены типа $\exp(i k_0 R_j) \exp(i \Phi_j^\gamma) \exp(-i \mathbf{k}'_0 \mathbf{r})$, которые соответствуют когерентному сложению поляризующих полей атома 1 или 2 с опорной волной. Выделим ℓ -ый участок в плоскости оптической голограммы. Тогда для опорной плоской волны имеем:

$$\mathbf{k}'_0 \mathbf{r}_\ell = k_0 \left(-\frac{L_x}{2} + \ell \Delta x \right) \sin \alpha_0 \cos 2\alpha_0 + k'_{0x} a_x + k'_{0y} a_y, \quad (15)$$

где L_x – длина голограммы в направлении оси x , $\ell = 1, 2, \dots$, α_0 – угол между фазовой плоскостью опорной волны и плоскостью голограммы, вектор $\mathbf{k}_0 \perp \mathbf{z}$, \mathbf{a} – длина оптического пути опорной волны от источника до фазовой плоскости, пересекающейся с плоскостью голограммы. Тогда для ℓp -го участка голограммы получим следующие выражения для разностей фаз:

$$\delta_1^\gamma = \Phi_1^\gamma + k_0 \sqrt{\left(-\frac{L_x}{2} + \ell \Delta x\right)^2 + R_0^2 + \left(\frac{L_z}{2} - p \Delta z\right)^2} - \mathbf{k}'_0 \mathbf{r}_\ell + \mathbf{k}_0 \mathbf{b}, \quad (16)$$

$$\delta_2^\gamma = \Phi_2^\gamma + k_0 \sqrt{\left(-\frac{L_x}{2} + \ell \Delta x\right)^2 + (R_0 - R)^2 + \left(\frac{L_z}{2} - p \Delta z\right)^2} - \mathbf{k}'_0 \mathbf{r}_\ell + \mathbf{k}_0 \mathbf{b}, \quad (17)$$

где \mathbf{b} – длина оптического пути предметной волны от источника до квантово-размерного объекта. Формулы (14), (16) и (17) позволяют определить местоположение максимумов и минимумов в голографической картине в зависимости от k_0 при заданных начальных фазах Φ_1^γ и Φ_2^γ атомов 1 и 2, влияющих на расположение интерференционных полос. В голографической ассоциативной памяти образуются в плоскости голограммы вдали от объекта интерференционные полосы с хорошим контрастом при когерентном сложении поляризующих полей с полем опорной волны лазерного излучения, а расположение максимумов в голограмме существенно зависит от структуры объекта.

Результаты

Диэлектрическая проницаемость кластера имеет вид:

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{4\pi e^2}{m} \sum_j \frac{|\langle \psi_0 | \mathbf{r} | \psi_j \rangle|^2}{\omega_{j0}^2 - \omega^2 - i\gamma\omega}, \quad (18)$$

где ω – частота, ψ – волновые функции. Диэлектрическая проницаемость кластера описывает оптические свойства кластеров, которые важны для голограмии.

Коэффициент поглощения кластера имеет вид:

$$\alpha(\omega) = \frac{4\pi\omega}{c} \operatorname{Im}(\epsilon(\omega)). \quad (19)$$

Коэффициент отражения среды с атомными кластерами при нормальном падении внешнего излучения имеет вид:

$$R = \left| \frac{n-1}{n+1} \right|^2 = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1} \right|^2. \quad (20)$$

Коэффициент отражения среды с атомными кластерами применим для описания однородных границ раздела сред.

Исследование физических характеристик системы нанокластеров в нанокомпозитной среде актуально в связи с растущим интересом к нанотехнологиям и практическому применению вnanoэлектронике. Рассмотрим нанокомпозитную среду с наночастицами серебра и нанокластерами серебра. Эффективная диэлектрическая проницаемость нанокомпозитной среды находится по формуле Максвелл-Гарнетта для наноразмерных включений двух типов: включений в виде системы наночастиц серебра и включений в виде системы нанокластеров серебра.

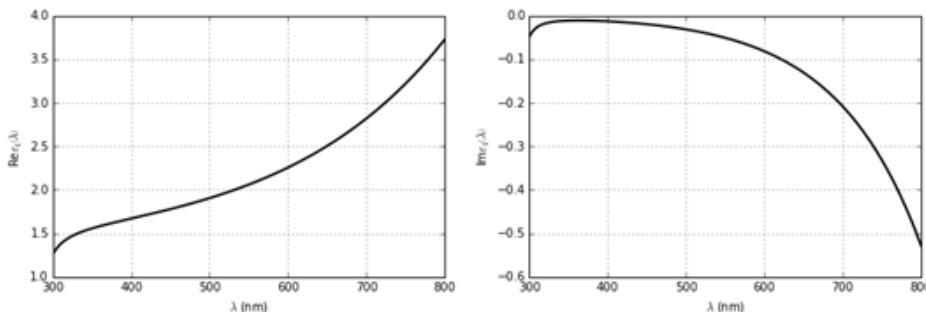


Рис. 1. Действительная часть и мнимая часть эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозитной среды с нанокластерами и наночастицами серебра в матрице из стекла K108 как функции длины волны оптического излучения.

На рис. 1 изображены графики действительной части и мнимой части эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозитной среды с нанокластерами и наночастицами серебра в матрице из стекла K108 как функции длины волны оптического излучения. Фактор заполнения наночастицами в среде равен 3.5 %. Фактор заполнения наночастицами серебра в среде равен 2.5 %. Характерный радиус наночастиц серебра равен 12 нм.

На рис. 2 изображены графики действительной части и мнимой части эффективного показателя преломления нанокомпозитной среды с нанокластерами и наночастицами серебра в матрице из стекла K108 как функции длины волны оптического излучения. Фактор заполнения наночастицами в среде равен 3.5 %. Фактор заполнения наночастицами серебра в среде равен 2.5 %. Характерный радиус наночастиц серебра равен 12 нм.

Заключение

Интеграция нанокластеров в нанокомпозиты значительно расширяет сферу оптических приложений до гибких оптоэлектронных устройств. Показано, что модель голограмической памяти на атомных кластерах демонстрирует высокую эффективность,

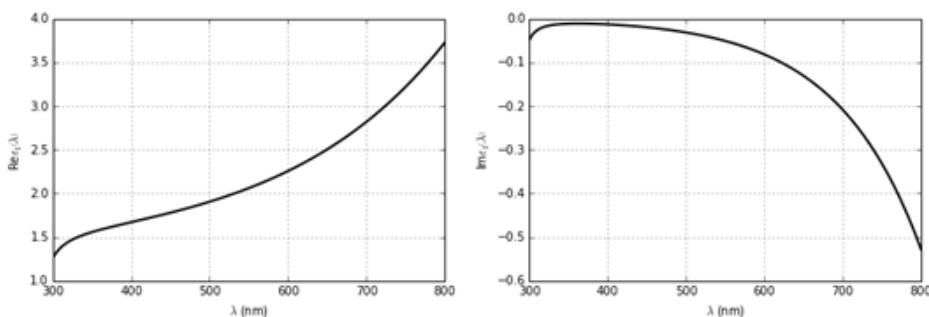


Рис. 2. Действительная часть и мнимая часть эффективного показателя преломления нанокомпозитной среды с нанокластерами и наночастицами серебра в матрице из стекла K108 как функции длины волны оптического излучения.

подтверждённую симуляциями, поскольку атомные кластеры обеспечивают стабильную голограммическую память с высокой плотностью.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что если использовать теоретические модели оптических процессов в системе нанокластеров в нанокомпозитных средах и результаты численных расчётов, то можно добиться усиленного оптического пропускания нанокомпозитной среды с нанокластерами, изменяя различные параметры нанокомпозитной среды, подтверждена полностью.

Теоретическая значимость исследования заключается в углублении понимания квантовых эффектов в кластерах, что способствует развитию теории голограммии. Рекомендуется применять атомные кластеры в оптических дисках следующего поколения для хранения больших объёмов данных.

Список использованных источников

1. Roman Gabor. Experiments with holographic associative memory // Acta Universitatis Sapientiae, Informatica. — 2022. — dec. — Vol. 14, no. 2. — P. 155–184. — URL: <http://dx.doi.org/10.2478/ausi-2022-0010>.
2. Holographic declarative memory: distributional semantics as the architecture of memory / Mary Alexandria Kelly [et al.] // Cognitive science. — 2020. — nov. — Vol. 44, no. 11. — URL: <http://dx.doi.org/10.1111/cogs.12904>.
3. Theoretical study of a surface collinear holographic memory / Soki Hirayama [et al.] // Photonics. — 2019. — jun. — Vol. 6, no. 2. — P. 70. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/photonics6020070>.
4. Recording and reconstruction of volumetric magnetic hologram using multilayer medium with heat dissipation layers / Yuichi Nakamura [et al.] // Optics express. — 2019. — sep. — Vol. 27, no. 20. — P. 27573. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/oe.27.027573>.
5. Azevedo Maria Isabel. Memory and holographic space // Practical holography XXXIV: displays, materials, and applications / Ed. by Hans I. Bjelkhagen. — SPIE, 2020. — feb. — P. 14. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2543766>.
6. Photofunctional gold nanocluster composites for bioapplications / Yujie Cong [et al.] // ACS applied bio materials. — 2024. — may. — Vol. 7, no. 5. — P. 2695–2703. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acsabm.4c00376>.

7. Gorbachev Alexander A., Tretinnikov Oleg N. Fluorescent nanocomposites of Ag nanoclusters grown in anionic polymer layers grafted to plastic substrate: preparation, characterization and evaluation in Hg^{2+} sensing and white light generation // Polymers for advanced technologies. — 2024. — may. — Vol. 35, no. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/pat.6415>.
8. Chakraborty Amrita, Pradeep Thalappil. Nanocluster-nanoparticle coassemblies // Atomically precise metal nanoclusters. — Elsevier, 2023. — P. 111–128. — ISBN: 9780323908795. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-90879-5.00019-6>.
9. Nanocomposite-based stretchable optics / Cristian Ghisleri [et al.] // Laser and photonics reviews. — 2013. — sep. — Vol. 7, no. 6. — P. 1020–1026. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/LPOR.201300078>.

Сведения об авторах:

Елена Алексеевна Илюшкина — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: elenailuskina2004@gmail.com

ORCID iD  0009-0001-2593-9829

Web of Science ResearcherID  JRW-6162-2023

Original article
 PACS 42.50.Gy
 OCIS 190.4870
 MSC 78A10

Investigation of the physical properties of holographic memory on atomic clusters

E. A. Ilyushkina 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted November 12, 2025

Resubmitted November 17, 2025

Published December 31, 2025

Abstract. The physical properties of holographic memory on atomic clusters are considered. The aim of this work is to theoretically study the physical properties of holographic memory based on atomic clusters in order to assess their potential in data storage and processing in a system of interacting nanoclusters in a nanocomposite medium located in an external field of an optical wave. The motivation of the research is due to the growing need for high-capacity and stable information storage systems in the context of miniaturization of optoelectronic devices. The research applied the methods of quantum mechanics and optical holography for modeling. The practical significance of the research lies in the possibility of using atomic clusters in the development of new generations of optical storage devices.

Keywords: optical radiation, cluster, atomic cluster, nanocomposite medium, holographic memory

References

1. Roman Gabor. Experiments with holographic associative memory // Acta Universitatis Sapientiae, Informatica. — 2022. — dec. — Vol. 14, no. 2. — P. 155–184. — URL: <http://dx.doi.org/10.2478/ausi-2022-0010>.
2. Holographic declarative memory: distributional semantics as the architecture of memory / Mary Alexandria Kelly [et al.] // Cognitive science. — 2020. — nov. — Vol. 44, no. 11. — URL: <http://dx.doi.org/10.1111/cogs.12904>.
3. Theoretical study of a surface collinear holographic memory / Soki Hirayama [et al.] // Photonics. — 2019. — jun. — Vol. 6, no. 2. — P. 70. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/photonics6020070>.
4. Recording and reconstruction of volumetric magnetic hologram using multilayer medium with heat dissipation layers / Yuichi Nakamura [et al.] // Optics express. — 2019. — sep. — Vol. 27, no. 20. — P. 27573. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/oe.27.027573>.
5. Azevedo Maria Isabel. Memory and holographic space // Practical holography XXXIV: displays, materials, and applications / Ed. by Hans I. Bjelkhagen. — SPIE, 2020. — feb. — P. 14. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2543766>.

6. Photofunctional gold nanocluster composites for bioapplications / Yujie Cong [et al.] // ACS applied bio materials. — 2024. — may. — Vol. 7, no. 5. — P. 2695–2703. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acsabm.4c00376>.
7. Gorbachev Alexander A., Tretinnikov Oleg N. Fluorescent nanocomposites of Ag nanoclusters grown in anionic polymer layers grafted to plastic substrate: preparation, characterization and evaluation in Hg²⁺ sensing and white light generation // Polymers for advanced technologies. — 2024. — may. — Vol. 35, no. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/pat.6415>.
8. Chakraborty Amrita, Pradeep Thalappil. Nanocluster-nanoparticle coassemblies // Atomically precise metal nanoclusters. — Elsevier, 2023. — P. 111–128. — ISBN: 9780323908795. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-90879-5.00019-6>.
9. Nanocomposite-based stretchable optics / Cristian Ghisleri [et al.] // Laser and photonics reviews. — 2013. — sep. — Vol. 7, no. 6. — P. 1020–1026. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/LPOR.201300078>.

Information about authors:

Elena Alekseevna Ilyushkina — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: elenailuskina2004@gmail.com

ORCID iD  0009-0001-2593-9829

Web of Science ResearcherID  JRW-6162-2023